

Docket No.: MOH-P010004

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant : JÜRGEN STABEL-WEINHEIMER ET AL.  
Filed : CONCURRENTLY HEREWITH  
Title : METHOD FOR PREVENTING FRETTING DAMAGE TO FUEL  
RODS, NUCLEAR REACTOR FUEL ELEMENT, DEVICE FOR  
PREVENTING FRETTING DAMAGE, AND SPACER IN A FUEL  
ASSEMBLY OF A NUCLEAR REACTOR

CLAIM FOR PRIORITY

Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

Claim is hereby made for a right of priority under Title 35, U.S. Code, Section 119,  
based upon the German Patent Application 101 03 729.5, filed January 26, 2001.

A certified copy of the above-mentioned foreign patent application is being submitted  
herewith.

Respectfully submitted,

  
\_\_\_\_\_  
For Applicants

LAURENCE A. GREENBERG  
REG. NO. 29,308

Date: July 2, 2003

Lerner and Greenberg, P.A.  
Post Office Box 2480  
Hollywood, FL 33022-2480  
Tel: (954) 925-1100  
Fax: (954) 925-1101

/kf

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

---



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 101 03 729.5

**Anmeldetag:** 26. Januar 2001

**Anmelder/Inhaber:** Framatome ANP GmbH, Erlangen/DE  
(vormals: Siemens Nuclear Power GmbH)

**Bezeichnung:** Verfahren zur Vermeidung von Reibungsschäden  
an Brennstäben, entsprechendes Kernreaktor-  
Brennelement und geeigneter Abstandhalter

**IPC:** G 21 C 3/336

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 16. Juni 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag



Dzierzon

## Beschreibung

Verfahren zur Vermeidung von Reibungsschäden an Brennstäben,  
5       entsprechendes Kernreaktor-Brennelement und geeigneter Ab-  
          standhalter

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Vermeiden von Reibungsschäden an Brennstäben eines Brennelementes für einen mit  
10       einen mit Leichtwasser gekühlten Kernreaktor. Soweit zufällig  
bereits Brennelemente gefertigt wurden, die unbeabsichtigt in  
bestrahltem Zustand oder unmittelbar nach ihrer Fertigung ähn-  
liche Merkmale, wie sie hier beschrieben sind, ausgewiesen ha-  
ben, betrifft die Erfindung die gezielte Verwendung dieser  
15       Merkmale zur Ausnutzung des von der Anmelderin entdeckten, un-  
erwarteten Effekts.

Die Ursache dieser Reibungsschäden liegt darin, dass zumindest  
Abschnitte der Brennstäbe vom Kühlmittelstrom des Kernreaktors  
20       in transversale Bewegungen versetzt werden und die Brennstäbe  
durch Maschen von einer Anzahl N übereinander in axialem Ab-  
stand angeordneten Abstandhaltern geführt und ihre seitlichen  
Bewegungen durch Haltelemente dieser Zellen begrenzt werden,  
jedoch die Haltelemente bereits im zweiten Einsatzzyklus des  
25       Brennelementes nicht mehr eine ausreichende Federkraft aufwei-  
sen, um Relativbewegungen zwischen den Halteelementen und den  
Brennstäben, die durch Eigenschwingungen der Brennstäbe her-  
vorgerufen sind, durch Haftreibung zu unterdrücken.

30       Die Erfindung betrifft ferner ein diesem Verfahren entspre-  
chendes Brennelement sowie insbesondere einen für dieses  
Brennelement geeigneten Abstandhalter.

Stand der Technik

In einem Kernreaktor, der durch Leichtwasser gekühlt wird, liegt der Brennstoff als Säulen aus gesinterten keramischen Brennstoff-Tabletten vor, die jeweils in einem gasdichten Hüllrohr aus Metall (in der Regel Zircaloy) gasdicht eingeschlossen sind. Damit die brennstoffentstehende Wärme rasch ins Kühlwasser abgeleitet wird, besitzen die Hüllrohre einen Innen-Radius, der nur um etwa 100 µm größer ist als der Radius der Tabletten, und sind mit Inertgas (in der Regel Helium) gefüllt. Eine Vielzahl solcher Brennstäbe sind durch die Maschen von mehreren in axialem Abstand übereinander angeordneten Abstandhaltern in einem geringen Abstand voneinander angeordnet, der aus Gründen der Reaktorphysik auch dann möglichst genau eingehalten werden muss, wenn das Kühlmittel mit hoher Geschwindigkeit an den Brennstäben entlang geführt wird und die Brennstäbe dadurch in seitliche Bewegungen geraten. Die Anzahl N dieser Abstandhalter, mit denen die Brennstäbe des Reaktors zu Brennelementen gebündelt werden, beträgt in der Regel N=8, und der Gehalt an spaltbarem Brennstoff ist so bemessen, dass dieses Brennelement gegenwärtig mindestens 4 Einsatzzyklen im Reaktor verbleiben kann, bevor es so weit abgebrannt ist, dass die Neutronenbilanz des Brennelements negativ wird und das Brennelement „abgebrannt“ ist, also durch ein frisches Brennelement ersetzt werden muss.

Die häufigste Ursache, die eine aufwendige Reparatur oder einen vorzeitigen Ersatz der Brennelemente erzeugen, sind Schäden an den Hüllrohren einzelner Brennstäbe, die durch Reibung („fretting“) entstehen. Daher ist im Fuß moderner Brennelemente, durch den der Kühlmittelstrom in das Brennelement geleitet, wird ein Fremdkörper-Filter vorgesehen, das abgebrochene Halteelemente von Abstandhaltern, bei Reparaturarbeiten ange-

fallene Metallteile und ähnliche Fremdkörper, die sich im Laufe des Reaktorbetriebes im Kühlwasser ansammeln, abfängt, damit sich diese Fremdkörper nicht zwischen den Brennstäben und Abstandhaltern verfangen können und bei den Vibrationen, die durch den Kühlmittelstrom erzeugt werden, nicht an den Hüllrohren reiben können („Fremdkörper-Fretting“). Jedoch werden insbesondere an den Stellen im Kühlwasserstrom, wo besonders starke Turbulenzen auftreten, trotzdem immer wieder Brennstäbe festgestellt, die durch Reibung der Hüllrohre an den Halteelementen in den Gittermaschinen der Abstandhalter („Eigen-Fretting“) derart bestätigt sind, dass sie vorzeitig ausgetauscht werden müssen.

Derartige Reibungsschäden können nicht auftreten, wenn die Halteelemente die Brennelemente mit einer derart hohen Kraft halten, dass jede Relativbewegung zwischen den Brennstäben und den Halteelementen unterbunden wird. Andererseits dürfen die Brennstäbe aber nicht bereits beim Einsetzen in die Maschen der Abstandhalter beschädigt werden. Bei Abstandhaltern, die von aneinander befestigten, die Brennstäbe jeweils ringförmig umgebenden Hülsen gebildet werden, ist daher in der Regel eine „5-Punkt-Halterung“ vorgesehen, die an drei in etwa gleichen Abständen über den Umfang des Brennstabes angeordneten Stellen am Hüllrohr angreifen. An einer dieser drei Stellen sitzt eine Feder oder ein ähnliches elastisches Halteelement, an den beiden anderen Stellen jeweils ein Paar aus zwei übereinander angeordneten starren Noppen, wobei die Stellen, an denen der Brennstab von der Feder an die Noppen gedrückt werden, etwa in gleichen axialem Abstand oberhalb und unterhalb der Auflagestelle der Feder liegen. Bei Brennelementen osteuropäischer Bauweise sind die Brennstäbe in 6-eckigen Maschen gehalten, die honigwaben-ähnliche Abstandhalter bilden, wobei ebenfalls eine derartige 5-Punkt-Halterung die Regel ist. In westlicher

Bauweise sind ferner Abstandhalter üblich, die auseinander rechtwinklig durchsetzenden Stegen gebildet werden („Egg crate spacer“), wobei auch in den dadurch entstehenden quadratischen Maschen eine derartige 5-Punkt-Halterung möglich ist, wenn die  
5 Feder diagonal in eine Ecke der Masche eingesetzt ist und die beiden Noppen-Paare jeweils in der Mitte der beiden gegenüberliegenden, aneinander angrenzenden Seitenflächen der Masche sitzen. Man kann in diesem Fall aber auch eine 6-Punkt-Halterung verwenden, bei der in der Mitte von zwei aneinander  
10 grenzenden Seitenflächen der Masche jeweils eine Feder sitzt, das den Brennstab gegen ein Noppen-Paar in der gegenüberliegenden Seite drückt.

Bei fabrikneuen Brennelementen müssen in der Regel die Halte-  
15 kräfte zumindest so groß sein, dass sie wesentliche Bewegungen der Brennstäbe unterbinden, um Transportschäden zu verhindern.

Solange die Halteelemente also den Brennstab derart festhalten, dass die dabei auftretende Haftreibung alle am Brennstab  
20 auftretenden dynamischen Kräfte, die zu einer Relativbewegung des Brennstabs führen könnten, aufnehmen kann, sind Reibungsschäden ausgeschlossen. Allerdings relaxieren elastische Halteelemente im Lauf der Zeit allmählich und bei der Strahlenbelastung im Reaktor sogar verhältnismäßig rasch, so dass zwar  
25 in frischen Brennelementen die erwähnte Haftreibung zur Vermeidung von Reibungsschäden ausreicht, aber in späteren Einsatzzyklen des Brennelements nicht mehr alle Bewegungen des Brennstabs in den Abstandhalter-Maschen verhindern kann.

30 Da die Brennstäbe nicht vollkommen starr sind, können sie selbst bei einer praktisch starren Halterung in den Ebenen der Halteelemente noch vom turbulenten Kühlwasserstrom in Schwingungen versetzt werden, die in diesen Ebenen Schwingungsknoten

5

aufweisen. Die Frequenzen dieser Eigenschwingungen ergeben sich aus den Abständen, mit denen die Halteelemente über die Länge des Brennstabs verteilt sind. Je starrer jedoch die Halterung an den Halteelementen ist, um so weniger werden diese  
5 Eigenschwingungen angeregt und umso weniger brauchen sie bei entsprechend kleiner Schwingungsamplitude gedämpft zu sein.

Man ist daher bisher praktisch davon ausgegangen, dass diese Eigenschwingungen ebenso wie andere Relativbewegungen zwischen  
10 den Halteelementen und den davon gehaltenen Teilen der Brennstäbe zu keinen Reibungsschäden an den Brennstäben führen, wenn es durch entsprechende Auswahl von Material und Formgebung der Halteelemente gelingt, diese Relativbewegungen in den Ebenen der Abstandhalter möglichst lange durch eine entsprechend hohe Federkraft und Haftreibung zu unterdrücken. Erst  
15 wenn anschließend, wenn die Federkraft der Halteelemente relaxiert, wächst die Neigung zum Eigen-Fretting.

Die Abstandhalter können nicht nur zur Halterung der Brennstäbe benutzt werden, sondern auch zu Erzeugen anderer Effekte, die für den Einsatz im Reaktor wünschenswert sind. So besitzt z.B. in Druckwasserreaktoren das Wasser, das in unmittelbarem Kontakt mit der heißen Brennstab-Oberfläche steht, eine höhere Temperatur als das Wasser, das sich in größerem Abstand von  
20 den Brennstäben befindet. Die Abstandhalter werden daher auch als Träger für Elemente benutzt, die durch Umlenkung des Kühlmittelstroms transversale Geschwindigkeitskomponenten und/oder Turbulenzen im Kühlmittelstrom erzeugen und zu einer Vermischung des Wassers und einer Vergleichmäßigung der Temperatur  
25 führen. Daher sind seit langem Abstandhalter üblich, die an der dem Kühlwasserstrom abgewandten Oberkante der Abstandhalter-Stege Strömungsleitfahnen zum Umlenkung der Strömungsrichtung tragen und dadurch zu Turbulenzen führen.  
30

In den US 4,756,878-A, US 4,726,926-A und US 4,849,161-A ist ein Abstandhalter vorgeschlagen, der geringere Turbulenzen erzeugt, aber bezüglich der Durchmischung und ähnlicher thermohydraulischer Eigenschaften vorteilhaft ist. Dabei sind jeweils benachbarte Maschen des Abstandhaltergitters durch Doppelstege voneinander getrennt, wobei die beiden Einzelwände des Doppelstegs flächig aneinander liegen, sich die Doppelstege aber nach Art des „Egg crate spacer“ rechtwinklig durchsetzen. In den zu den Brennstäben senkrechten Querebenen sind zwischen zwei Maschenecken die beiden Einzelwände trapezartig voneinander weg gewölbt, dass ein von unten nach oben verlaufender Zwischenkanal entsteht, wobei das obere Ende dieses Zwischenkanals in der Ebene des Doppelstegs derart gebogen ist, dass das diesen Zwischenkanal verlassende Kühlmittel eine seitliche Ablenkung erfährt. Im geradlinigen Teil des Zwischenkanals ist jede Einzelwand in der zu den Brennstäben parallelen Längsebene etwa bogenförmig gewölbt, um eine Auflagefläche für den Brennstab zu bilden. Diese bogenförmige Wölbung ist außerdem durch einen Längsschlitz geteilt, so dass zwei federnde Halteelemente an dieser Seitenwand des Strömungskanals entstehen, in einer Masche also eine 8-Punkt-Halterung. Die acht „Halte-Punkte“ sind allerdings langgestreckte Auflageflächen. Sie sind derart konstruiert, dass im unbestrahlten Zustand die bogenförmigen Halteelemente bei einer Länge von etwa 3 cm beim Einsetzen der Brennstäbe derart zusammengedrückt werden sollen, dass sie etwa mit der Hälfte dieser Länge am Brennstab anliegen. Alle acht Auflageflächen liegen dabei auf dem gleichen axialen Niveau, so dass sie nur ein Teilstück des Brennstabs halten, der etwa eine axiale Länge von 15 mm haben sollte.



Derartige Abstandhalter zeigen bei hohen Temperaturen ein vorteilhaftes Verhalten und werden daher von ihren Erfindern und dem Hersteller, der gleichzeitig der Anmelder des vorliegenden Patents ist, „High temperature performance“ - Abstandhalter

5 „HTP“ genannt. Die Erfahrungen des Anmelders mit diesem Abstandhalter zeigen, dass an Positionen im Reaktorkern ein denen früher Brennelemente mit 5-Punkt-Halterung der Brennstäbe eingesetzt waren und häufig Reibungsschäden auftraten, derartige Schäden nicht mehr aufgetreten sind, sobald hier Brennelemente mit „HTP“ Abstandhaltern eingesetzt sind. Die Ursachen dieses günstigen Verhaltens gegenüber möglicher Reibungsschäden ist unbekannt, und insbesondere ist unbekannt, in welche Richtung ein derartiger Abstandhalter weiter entwickelt werden sollte, um Reibungsschäden noch zuverlässiger zu vermeiden.

15

Da die gebogenen Austrittsenden der Strömungskanäle in den vier einem Brennelementstab umgebenden Doppelstegen im Zwischenkanal transversale Strömungskomponenten erzeugen, die zu einer um den Brennstab umlaufenden Kreisströmung mit geringen Turbulenzen führen, ist es z.B. möglich dass bei dieser Strömung nur besonders geringe Relativbewegungen des Brennstabes ausgelöst werden. Übrigens ist es so möglich, dass bereits die Schlitzte in den zum Brennstab parallelen Zwischenkanälen mit dem Druckausgleich nach beiden benachbarten Maschen dazu führen, dass der Kühlwasserstrom an Stellen, an denen er aufgrund der Geometrie des Reaktorkerns besonders zu Turbulenzen neigt, bereits beruhigt wird und daher ebenfalls einer starken Relativbewegung auslöst. Ebenso ist es aber möglich, dass dieser Druckausgleich in Kombination mit der doppelwandigen Ausführung der Stege, die daher eine Zone mit höherem Strömungswiderstand und höherer Strömungsgeschwindigkeit bilden, der Anregung von größeren Relativbewegungen entgegnen wirkt. Der wesentliche Unterschied kann aber auch

20

25

30

8

sentliche Unterschied kann aber auch bereits in dem Übergang von einer 5-Punkt-Halterung bzw. 6-Punkt-Halterung auf eine 8-Punkt-Halterung liegen, insbesondere weil die einzelnen Auflageflächen hier linienförmig mit einer verhältnismäßig langen axialen Erstreckung ausgebildet sind. Zusammen mit dem Materialeigenschaften des als Wandmaterial verwendeten Zircalloys und der besonderen Formgebung als aufgebogene Zwischenkanäle können diese 8 Auflageflächen auch eine besonders günstige Verteilung der Federkraft darstellen, die die erwähnte, zu Vermeidung von Reibungsschäden als vorteilhaft angesehene Haftreibung über lange Zeit auch bei einer Relaxierung der Federn sicherstellen.

Sollte diese letzte Annahme zutreffen, so wäre die Bildung der erwähnten, gekrümmten Ausgänge der Halterung verflüssigt und würde nur eine unnötig aufwendige Fertigung darstellen. Außerdem stellen sich auch einen verhältnismäßig hohen Strömungswiderstand im allgemeinen als nachteilig angesehen. WO?! ↙  verschiedene Möglichkeiten beschrieben worden, eine derartige 8-Punkt-Halterung auf einen aus Einfach-Stegen gebildeten „Egg crate spacer“ zu übertragen. Ziel dieser Übertragung wäre dann, möglichst viele langgestreckte Halteelemente zu verwenden, die sich über einen möglichst langen axialen Abschnitt des Brennstabs erstrecken.

Es ist aber unbekannt, welche der verschiedenen Merkmale, die bei dem erwähnten HTP-Abstandhalter aus Gründen der high temperature performance kombiniert wurden, das Reibungsverhalten entsprechender Brennelemente verbessern und ob die angegebene Vergrößerung von Zahl und Länge der Auflagepunkte sich positiv oder negativ (oder überhaupt nicht) auf das Reibungsverhalten auswirkt.

P010004DE

Mörtel&amp;Höfner



8

sentliche Unterschied kann aber auch bereits in dem Übergang von einer 5-Punkt-Halterung bzw. 6-Punkt-Halterung auf eine 8-Punkt-Halterung liegen, insbesondere weil die einzelnen Auflageflächen hier linienförmig mit einer verhältnismäßig langen axialen Erstreckung ausgebildet sind. Zusammen mit dem Materialeigenschaften des als Wandmaterial verwendeten Zircalloys und der besonderen Formgebung als aufgebogene Zwischenkanäle können diese 8 Auflageflächen auch eine besonders günstige Verteilung der Federkraft darstellen, die die erwähnte, zu Vermeidung von Reibungsschäden als vorteilhaft angesehene Haftreibung über lange Zeit auch bei einer Relaxierung der Federn sicherstellen.

Sollte diese letzte Annahme zutreffen, so wäre die Ausbildung der erwähnten, gekrümmten Ausgänge der Zwischenkanäle überflüssig und würde nur eine unnötig aufwendige Konstruktion und Fertigung darstellen. Außerdem stellen doppelwandige Stege auch einen verhältnismäßig hohen Strömungswiderstand dar, der im allgemeinen als nachteilig angesehen wird. Daher sind schon verschiedene Möglichkeiten beschrieben worden, eine derartige 8-Punkt-Halterung auf einen aus Einfach-Stegen gebildeten „Egg crate spacer“ zu übertragen. Ziel dieser Übertragung wäre dann, möglichst viele langgestreckte Halteelemente zu verwenden, die sich über einen möglichst langen axialen Abschnitt des Brennstabs erstrecken.

Es ist aber unbekannt, welche der verschiedenen Merkmale, die bei dem erwähnten HTP-Abstandhalter aus Gründen der high temperature performance kombiniert wurden, das Reibungsverhalten entsprechender Brennelemente verbessern und ob die angegebene Vergrößerung von Zahl und Länge der Auflagepunkte sich positiv oder negativ (oder überhaupt nicht) auf das Reibungsverhalten auswirkt.

Aufgabe der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die erwähnten Schäden, die durch Reibung der Halteelemente des Abstandhalters an den Brennstäben entstehen können, möglichst zuverlässig zu vermeiden. Dies führt zu einem Verfahren, bei dem durch Verwendung von Brennstäben und/oder Abstandhaltern mit besonderen Merkmalen diese Reibungsschäden vermieden werden, sowie zu einem entsprechenden Brennelement bzw. einem entsprechenden Abstandhalter.

Die Erfindung setzt dabei ein besseres Verständnis der für Reibungsschäden verantwortlichen Vorgänge voraus, denn nur dieses Verständnis ermöglicht, sich auf die Eigenschaften zu konzentrieren, die für Reibungsschäden entscheidend sind, und einen Abstandhalter (allgemeiner: ein Brennelement) zu schaffen, der das gleiche oder sogar ein besseres Fretting-Verhalten wie der HTP-Abstandhalter erzeugt, aber in anderen Merkmalen, die bezüglich des Fretting-Verhaltens unwichtig sind, von diesem Stand der Technik abweicht. Es geht also insbesondere um die gezielte Auswahl, Übertragung und ggf. Verbesserung von bestimmten Merkmalen des HTP-Abstandhalters auf Ausführungen, die in anderen Merkmalen vom Stand der Technik abweichen können bzw. abweichen.

Entdeckung

In den im folgenden noch genauer beschriebenen Versuchen wurde von einem üblichen 5-Punkt-Abstandhalter ausgegangen, in dessen Maschen in einem ersten Versuch ein Brennstab eingesetzt wurde, bei dem der Durchmesser der Tablettensäule gegenüber dem Innendurchmesser des Hüllrohrs derart verringert war, dass

10

die Tabletten sich bei einer Vibration des Brennstabs gegeneinander verschieben und aneinander reiben können. Diese Verschiebung wurde im ersten Versuch aber dadurch verhindert, dass ein Draht in den Zwischenraum zwischen Tablettensäule und Hüllrohr eingeklemmt wurde. In einem zweiten Versuch wurde dieser Draht weggelassen und in einem dritten Versuch wurde ein Brennstab mit ebenfalls fixierten Tabletten, jedoch einem Außendurchmesser verwendet, der etwa 0,05 mm geringer war als der Durchmesser der den Brennstab aufnehmenden Öffnung, die im Abstandhalter durch die Halteelemente definiert wird. In allen drei Fällen wurde diese Brennstab-Abstandhalter-Anordnung in einem Test-Kanal einem Wasserstrom ausgesetzt, dessen Turbulenzen die Anordnung in Schwingungen versetzte.

Im ersten Versuch wurden starke Reibungsschäden am Brennstab beobachtet, die den Reibungsschäden entsprechen, wie sie auch bei Brennstäben beobachtet sind, die im Lauf eines realen Einsatzes im Reaktor unbrauchbar geworden waren.

Überraschenderweise stellte die Anmelderin jedoch fest, dass in den beiden anderen Versuchen praktisch kein Abrieb durch Fretting entstanden ist.

Der erste Versuch simuliert praktisch die Bedingungen in einem Brennelement, das am Beginn seiner Einsatzzeit („begin of life“, BOL) steht und zeigt, dass eine hohe Federkraft mit einer entsprechend hohen Haftreibung nicht ausreicht, um Fretting-Schäden zu vermeiden. Eine genauere Analyse der Bewegungen des Brennelements und der Brennstäbe zeigt, dass die Federkraft zwar ausreicht, um stochastische Bewegungen, die durch die turbulente Anregung entstehen, zu beherrschen, jedoch Eigenschwingungen („selbstinduzierte“ Vibrationen) in Form von Biegeschwingungen auftreten, bei denen die Brennstäbe Kippbewe-

gungen in ihren Halteelementen ausführen. Diese Biegeschwingungen sind umso schwächer gedämpft, je starrer die Brennstäbe in den Maschen gehalten werden. Zwar führt die starrere Halterung auch dazu, dass eine ausgeübte Kraft den Brennstab auch  
5 nur geringfügig aus seiner Ruhelage ablenkt (bei den Biegeschwingungen also auch nur um einen geringen Winkel  $\phi$  kippt); jedoch können sich bei periodischer Kraft die Amplituden erheblich aufschaukeln und die Halteelemente der zu einem entsprechend starken Fretting führen. Beim zweiten Versuch  
10 tritt zur Haftreibung aber noch eine erhöhte Dämpfung der Biegeschwingungen, die sich aufgrund dieser Dämpfung auch nur zu geringen Amplituden aufschaukeln können. Entsprechend sind die Kippbewegungen und das entsprechende Fretting wesentlich schwächer.

15

Beim dritten Versuch üben die Halteelemente - über eine Schwingungsperiode gemittelt - eine geringere Kraft auf die Brennstäbe aus, die etwa dem Zustand des Brennelements am Ende seiner Einsatzzeit („end of life“, EOL) entspricht. Während  
20 man früher glauben konnte, das Brennelement würde immer empfindlicher gegen Frettingschäden, je länger es bereits eingesetzt ist und je schwächer daher die Federkraft seiner Halteelemente wird, zeigt sich, dass das Brennelement beim Erlahmen der Halteelemente immer unempfindlicher gegenüber Fretting  
25 wird. Die Analyse der Schwingungszustände zeigt, dass beim dritten Versuch die „selbstinduzierten Schwingungen“ im gleichen Maße wie beim zweiten Versuch gedämpft sind und daher nur entsprechend niedrige Amplituden der Kippbewegungen auftreten.

30

Zur Vermeidung von Fretting-Schäden sollte also bereits der BOL-Zustand möglichst dem EOL-Zustand bisheriger Brennelemente entsprechen.

Es ergibt sich also, dass hohe Federkräfte und eine entsprechend hohe Haftreibung zur Anregung ungedämpfter Eigenschwingungen mit Fretting fördernden Kippbewegungen führen, also schädlich sind, während eine erhöhte Dämpfung einer solchen  
5 Eigenschwingung, falls sie durch die Strömungsturbulenzen angeregt wird, Energie entzieht und daher die Amplituden der Kippbewegungen begrenzt und das Fretting verhindert.

Eine erhöhte Dämpfung kann demnach durch eine Erhöhung der inneren Reibung im Brennstab erreicht werden, zum Beispiel in  
10 dem der unbestrahlte Brennstab hergestellt wird aus einer Tabletensäule, deren Außendurchmesser etwa 300µm kleiner ist als der Innendurchmesser des Hüllrohrs.

Die Dämpfung kann aber auch durch die Energie eingestellt werden, die dem Brennelement durch eine erhöhte transversale Beweglichkeit einiger Brennstäbe in den Zellen der Abstandhalter entzogen werden kann. Zum Beispiel können Abstandhalter mit Halteelementen eingestellt werden, die dem Brennstab eine Aufnahmeöffnung bieten, deren Radius um etwa 0,05µm größer ist  
20 als der Außenradius des Brennstabs.

Vor allem kann die Dämpfung auch durch Halteelemente eingestellt werden, die bei einem Kippwinkel  $\varphi=0,1^\circ$  des Brennstabs gegenüber dem Abstandhalter höchstens ein Drehmoment  $M=10\text{ N}\cdot\text{mm}$   
25 auf den Brennstab ausüben. Dies kann zum Beispiel erreicht werden, wenn der Brennstab an den Auflageflächen der Halteelemente einer Masche derart gehalten ist, dass der höchste Punkt, mit dem der Brennstab eine dieser Auflageflächen berührt, höchstens 10mm (vorteilhaft höchstens 5mm, insbesondere  
30 höchstens 3mm) über dem niedrigsten Punkt liegt, an dem der Brennstab eines der Halteelemente dieser Masche berührt. Allerdings sollte die Längsausdehnung jeder Auflagefläche min-

destens etwa 1mm betragen, um punktförmige Belastungen des Brennstabs zu vermeiden. Entsprechend dieser Ausführung wird also der Brennstab nur auf einem verhältnismäßig kurzem Teilstück (axiale Länge höchstens 10mm oder weniger) von den Halteelementen gehalten, deren Federkraft daher in allen realistischen Fällen nicht ausreicht, um relative Kippbewegungen der Brennstäbe von  $0,1^\circ$  zu verhindern, jedoch entsprechende Kipp-  
5 schwingungen wirksam dämpfen. Je größer aber die axiale Länge des von den Halteelementen gehaltenen Teilstücks des Brennstabes gewählt wird. (D.h. umso steifer die Halterung des Stabes in den Halteelementen wird, umso größer wird zwar die für eine einmalige Auslenkung erforderliche Kraft, jedoch wird die Dämpfung der Biegeschwingungen geringer und daher nimmt deren Amplitude zu.)

15

Die Anmelderin hat also entdeckt, dass bei den vom Wasserstrom angeregten Schwingungen des Brennelements Biegeschwingungen entscheidend sind, deren Anregung und Amplitude zunimmt, je steifer die Brennstäbe und ihre Halterung in den Brennelementen sind, weil diese Steifheit mit einer Abnahme der Dämpfung verbunden ist. Eine steife Halterung fördert also Fretting und ist schädlich.

20

Der Leser erkennt, dass diese Entdeckung nicht Stand der Technik ist und vom Stand der Technik nicht Gebrauch macht.

25

#### Zusammenfassung der Erfindung

Die Erfindung betrifft also den Einsatz von Brennelementen in einem mit Leichtwasser gekühltem Reaktor, wobei zumindest Abschnitte der Brennstäbe des Brennelements vom Kühlmittelstrom in transversale Bewegungen versetzt werden und die Brennstäbe durch Maschen von mehreren übereinander in axialem Abstand an-

30



geordneten Abstandhaltern geführt werden, die transversalen Bewegungen aber durch Halteelemente in diesen Zellen begrenzt werden. Jedoch besitzen die Halteelemente spätestens im zweiten Einsatzzyklus des Brennelements nicht mehr die ausreichende Federkraft, um durch Eigenschwingungen des Brennelements hervorgerufene Relativbewegungen zwischen den Halteelementen und den Brennstäben durch Haftreibung zu unterdrücken. Erfindungsgemäß werden bei diesem Einsatz des Brennelements Abstandhalter und Brennstäbe verwendet, die derart aufeinander abgestimmt sind, dass den Eigenschwingungen des Brennelements durch erhöhte Dämpfung Energie entzogen wird.

Unter „erhöhte Dämpfung“ wird dabei eine Dämpfung verstanden, die über den mit üblicher 5-Punkt-Halterung erzeugbaren Dämpfung liegt. Beschreibt man die vom Kühlwasserstrom anregbaren, selbst induzierten Biegeschwingungen - diese sind Eigenschwingungen mit den Biegeschwingungs-Moden bis zur Ordnung N, wobei N die Anzahl der im Brennelement benutzten Abstandhalter ist und diese Eigenschwingungen des Brennelements in Phase mit den entsprechenden Eigenschwingungen des Brennstabs sind - mit der Eigenschwingung-Gleichung

$$\frac{d^2x}{dt^2} + D \cdot w \cdot \frac{dx}{dt} + w^2x = 0$$

so bezeichnet D die Dämpfung und kann in Prozent ausgedrückt werden. Wie noch gezeigt wird, sind vor allem die Moden (N-2) und (N-3) für Fretting verantwortlich. Für den Mode der Ordnung (N-2) liegt die Dämpfung einer Schwingung der Amplitude 50µm in einem Brennelement mit üblicher 5-Punkt-Halterung der Brennstäbe in Luft unter 0,35%. Gemäß der Erfindung wird dieser Mode aber stärker gedämpft. Die Moden niedrigerer Ordnung sind für das Fretting-Verhalten weniger wichtig, da sie

15

von Natur aus wesentlich stärker gedämpft sind und daher entsprechende Eigenschwingungen nur mit wesentlich geringerer Amplitude angeregt werden können, wie noch gezeigt werden wird. Außerdem ist die erhöhte Dämpfung des Modes (N-2) eben-  
5 falls mit einer erhöhten Dämpfung der niedrigeren Modes verbunden, so dass es genügt, sich auf den Mode (N-2) zu konzentrieren.

Bei diesem Verfahren kann die erhöhte Dämpfung dadurch eingestellt werden, dass die Energie erhöht wird, die den Brennstäben, sofern deren Eigenschwingungen angeregt sind, durch die Beweglichkeit und Reibung der in den Brennstäben enthaltenen Brennstofftabletten entzogen wird, d.h. der Energie, die den Eigenschwingungen der Brennstäbe durch „innere Dämpfung“ ent-  
15 zogen werden kann. Ein Beispiel hierfür ist bei dem bereits erwähnten zweiten Versuch angegeben.

Man kann bei diesem Verfahren zur Vermeidung von Reibungsschäden die erhöhte Dämpfung auch dadurch einstellen, dass die Energie verändert wird, die dem Brennelement durch eine erhöhte translatorische Beweglichkeit zumindest einiger Brennstäbe in einigen Zellen der Abstandhalter entzogen werden kann, d.h. die Energie, die durch eine Dämpfung der seitlichen Bewegungen der Brennstäbe in den Abstandhalter-Maschen entziehbar ist. Ein  
25 Beispiel hierfür ist in dem erwähnten dritten Versuch angegeben.

Beide Möglichkeiten erfordern allerdings, dass die Tabletten-säule bzw. der Brennstabdurchmesser gegenüber den bekannten und bewährten Brennstäben verändert wird, was nur nach langwierigen Sicherheitsberechnungen und Erprobungen möglich ist.  
30

P010004DE

16  
Bevorzugt wird bei diesem Verfahren zur Vermeidung von Reibungsschäden die erhöhte Dämpfung durch Halteelemente eingestellt, die bei einem Kippwinkel  $\varphi = 0,1^\circ$  des Brennstabs höchstens ein Drehmoment  $M = 10 \text{ N} \cdot \text{mm}$  auf den Brennstab ausüben. Bevorzugt sind die Halteelemente der meisten (insbesondere aller) einen Brennstab bzw. alle Brennstäbe aufnehmenden Maschen derart ausgebildet. Diese Möglichkeit ist ebenfalls bereits näher erläutert. Dies gilt natürlich nicht für Maschen, die nicht von Brennstäben durchsetzt sind, wie z.B. Maschen mit Steuerstab-Führungsrohren (Druckwasser-Reaktor) oder Wasserstäben (Siedewasser-Reaktor).

15  
Ferner führt die Erfindung zu einem mit einem Leichtwasserstrom gekühlten Kernreaktor, der Brennstäbe aufweist, die durch Maschen von mehreren übereinander in axialem Abstand angeordneten Abstandhaltern geführt sind und in ihrer seitlichen Beweglichkeit von Halteelementen begrenzt sind, die in den Maschen angeordnet sind und Haltekräfte auf die Brennstäbe ausüben. Bei einem solchen Brennelement reichen die Haltekräfte der Halteelemente spätestens im zweiten Einsatzzyklus des Brennelements nicht mehr aus, um zwischen den Halteelementen und den Brennstäben Relativbewegungen, die im Leichtwasserstrom durch Eigenschwingungen der Brennstäbe bedingt sind, zu unterbinden. Erfindungsgemäß sind bei einem derartigen Brennelement zumindest einige Brennstäbe und Maschen derart aufeinander abgestimmt, dass den Eigenschwingungen des Brennelements durch erhöhte Dämpfung ständig Energie entzogen wird. Vorteilhaft sind zumindest die inneren Brennstäbe und der unterste Abstandhalter derart aufeinander abgestimmt. (Unter „inneren Brennstäben“ sind dabei die Brennstäbe verstanden, die nicht direkt am Rand des Brennelementes stehen.)

26.01.2001 15:55

P010004DE

Die Erfindung führt ferner zu einem vorteilhaften Abstandhalter für mehrere jeweils eine Masche eines Brennelementes durchsetzende Brennstäbe, der für ein Brennelement vorgesehen ist einem Leichtwasserstrom gekühlten Kernreaktors vorgesehen ist

- 5 und jeweils mehrere Halteelemente in einer solchen, für die Aufnahme eines Brennstabes bestimmten Masche jeweils mehrere Halteelemente aufweist, die im unbestrahlten Zustand des Abstandhalters den Brennstab mit einer vorgegebenen Haltekraft in einer vorgegebenen zeitlichen Position halten. Bei einem solchen Einsatzzyklus des Brennelementes bereits nicht mehr
- 10 zweiten Einsatzzyklus des Brennelementes darstellt, aus, um zwischen dem Abstandhalter und den Brennstäben eine Relativbewegung zu unterbinden, die eine vom Leichtwasserstrom hervorgerufene Eigenschwingung des Brennelementes darstellt,
- 15 Erfindungsgemäß sind die Halteelemente derart ausgebildet, dass sie nach Einsetzen des betreffenden Brennstabes an diesem Brennstab mit mehreren langgestreckten Auflageflächen anliegen, deren Längsausdehnung jeweils mindestens 1mm beträgt. Der
- 20 höchste Auflagepunkt des Brennstabes in dieser Masche liegt dabei höchstens 10mm (vorzugsweise höchstens 5mm, insbesondere höchstens 3mm) über dem niedrigsten Auflagepunkt des Brennstabes in der gleichen Masche; mit anderen Worten: Betrachtet man die Halteelemente als Teil des Abstandhalters, so definiert der höchste und der niedrigste Berührungspunkt zwischen Brennstab und Abstandhalter gehalten ist, und maximal die angegebene Länge besitzt.

Halteelemente, die ein derart kurzes Teilstück des Brennstabes halten, sind zwar in der Lage, auch nach betriebsbedingter Relaxation der Federkräfte die stochastisch auftretenden translatorischen Relativbewegungen dieser Teilstücke aufzunehmen und praktisch zu unterbinden, jedoch können sie relative Kipp-

26.01.2001 15:55

18

bewegungen dieser Teilstücke selbst im unbestrahlten Zustand nicht auffangen, sondern ermöglichen noch Mikrobewegungen.

Sind diese Mikrobewegungen durch Biegeschwingungen angeregt, so erzeugen sie eine Reibung, die zu keinen Reibungsschäden

5 führen, aber auf diese Schwingungen dämpfend wirken

Die oben angegebene Entdeckung soll insbesondere zu einem Abstandhalter bzw. einer Abstimmung von Abstandhalter und Brennstab führen, die sich von dem bereits erwähnten HTP-

10 Abstandhalter unterscheiden. Daher betrifft die Erfindung insbesondere einen Abstandhalter, der nicht die folgende Kombination von Merkmalen enthält:

Jeweils zwei flächig aneinanderliegende und punktförmig miteinander verschweißte Wände der Breite  $b=4$  bis 4,5cm bilden

15 Doppelstege. Die Doppelstege sind unter Ausbildung quadratischer Maschen mit einer Seitenlänge  $s$  zur Aufnahme eines Brennstabs oder eines Führungsrohres ineinander gesteckt und

an ihren Oberkanten und Unterkanten miteinander verbunden. In der Mitte zwischen zwei Kreuzungsstellen von Doppelstegen ist  
20 jede Wand, die eine zur Aufnahme eines Brennstabs bestimmte Masche begrenzt, mit einem Längsschlitz versehen, der etwa im gleichen Abstand von der Oberkante und der Unterkante der Wände endet und eine Länge zwischen  $0,6 \cdot b$  bis  $0,65 \cdot b$  besitzt. Die

die Schlitz tragenden Wände sind in einer zu den Brennstäben senkrechten Querebene etwa trapezförmig in die betreffende Masche hineingebogen, so dass zwischen zwei benachbarten Brennstäben ein von unten nach oben durchgehender Zwischenkanal entsteht. Die Ränder der zweiten Schlitz sind in einer zum Brennstab parallelen Längsebene Bogenförmig gebogen und liegen,  
30 wenn der betreffende Brennstab in die Masche eingesetzt ist, auf einer Länge zwischen 3-10 mm am Brennstab an.

Bevorzugt sind zumindest die für die inneren Brennstäbe vorgesehenen Maschen gleich ausgebildet. Bei Abstandhaltern mit quadratischen Maschen tragen vorteilhaft die vier Maschenwände jeweils Halteelemente. Vorteilhaft sind alle Halteelemente als elastische Federn ausgebildet. In hexagonalen Maschen sind die Halteelemente oder Paare von Halteelementen derart angeordnet, dass sie mit etwa gleichem Umfangswinkel längs des Umfangs der Brennstäbe verteilt sind, wobei mindestens drei Maschenwände Halteelemente tragen. Vorteilhaft sind alle Maschenwände, die Halteelemente für Innenstäbe tragen, gleich ausgebildet. Bei allen Ausführungsformen ist es vorteilhaft, wenn über und unter einem an einem Brennstab anliegenden federnden Halteelement einer Masche zur Begrenzung der Bewegungsamplituden des Brennstabs jeweils ein starres Sicherheitselement vorgesehen ist, das einen Abstand zwischen 0,1 und 0,5 mm vom entsprechenden Brennstab im Ruhezustand hat.

#### Kurzbeschreibung der Figuren

Anhand von mehreren Zeichnungen werden die Erfindung und bevorzugte Ausführungsbeispiele näher erläutert.

Es zeigen:

- Figur 1: eine Aufsicht auf ein Druckwasser-Brennelement  
Figur 2 und 3: Aufsicht und Längsschnitt (entlang der Linie III-III in Fig.2) durch eine Masche eines erfindungsgemäßen Abstandhalters;  
Figur 4: einen entsprechenden Längsschnitt bei einem herkömmlichen 5-Punkt-Abstandhalter;  
Figur 5 und 6: Schwingungsspektren eines herkömmlichen Brennelements im BOL- und EOL-Zustand verschiedener Strömungsgeschwindigkeiten;

20

Figur 7 und 8: Schwingungsspektren eines Brennelements ohne und mit innerer Reibung und Dämpfung der Brennstäbe.

Figur 9: schematisch den Ruhezustand, einen unmöglichen und einen möglichen Schwingungszustand des Brennelements.

Figur 10: die Verschiebung des Brennstabs gegenüber der Ruhelage als Funktion des Ortes auf dem Brennstab.

Figur 11 und 12: die Kippwinkel des Brennstabs als Funktion des Ortes für die Moden der Ordnung 1 und (N-2).

Figur 13: die Positionen von Brennstab und federndem Halteelement bei Kippschwingungen in üblichen Abstandhaltern.

Figur 14: das für einen Kippwinkel  $\varphi$  eines Brennstabs erforderliche Drehmoment M

Figur 15 und 16: den Figuren 13 und 14 entsprechende Darstellungen bei der Erfindung.

Figur 17 und 18: die Dämpfung für die Modes (N-3) und (N-2) bei konventioneller Lagerung und gemäß der Erfindung.

Figur 19: einen HTP-Abstandhalter mit Führungsrohr und einen Brennstab.

Figur 20: die Doppelstege dieses Abstandhalters vor dem Zusammenbau

Figur 21: die Wirkung des Zwischenkanals auf die Brennstäbe dieses Abstandhalters

Figur 22 und 23: ein weiteres Ausführungsbeispiel eines Abstandhalters nach der Erfindung.

### Erläuterungen der Erfindung und Ausführungsbeispiele

P010004DE

21

Da die in Siedewasserreaktoren beobachteten Reibungsschäden bisher praktisch ausschließlich auf das eingangs erwähnte Fremdkörper-Fretting zurückgehen, aber in Druckwasserreaktoren für die meisten der (allerdings äußerst seltenen) Beschädigungen die Ursache in der direkten Reibung zwischen Brennstab und Halteelementen liegt, ist die Erfindung in erster Linie für Brennelemente in Druckwasserreaktoren bestimmt und wird für diese beschrieben.

- 10 Ein derartiges Druckwasser-Brennelement (Figur 1) besitzt einen Kopf K und einen Fuß F, die durch Steuerstab-Führungsrohre G miteinander verbunden sind. An diesen Führungsrohre sind mehrere (in der Regel 8 bis 9) Abstandhalter SP befestigt, die z.B. aus aneinander geschweißten Hülsen bestehen können, im dargestellten Fall aber als Gitter aus einander rechtwinklig kreuzenden Stegen ausgebildet sind. In den durch entstehenden, kreisrunden oder rechteckigen Maschen sind die Führungsrohre G und die Brennstäbe FR eingesetzt.

- 20 In der Aufsicht auf eine Masche eines „Egg crate“-Abstandhalters (Fig.2) erkennt man die sich kreuzenden Stege 1 und 2 aus Zircaloy, die in diesem Fall ein Eck mit Fenstern aufweist, in die eine Feder 3 aus Inconel eingesetzt ist. Die in der gegenüberliegenden Ecke aneinander stoßenden Wände der Masche weisen jeweils eine in die gleiche Masche gerichtete Wölbung auf, die in Fig.3 genauer erkennbar ist. Diese Noppen bilden somit praktisch starre Halteelemente 4, gegen die der Brennstab 5 von den federnden Halteelement 3 gedrückt wird. Wie in Fig.3 gezeigt, befinden sich die federnden und starren Halteelemente 3,4 auf einem gemeinsamen Niveau, wobei der höchste Punkt h<sub>1</sub>, an dem der Brennstab 5 an einem der Halteelemente 3,4 anliegt, von dem tiefsten Anlagepunkt h<sub>2</sub> einen axialen Abstand d<sub>0</sub> hat der in diesem Fall 3mm beträgt. Bei die-

26.01.2001 15:55



ser Ausbildung der Halteelemente sind die Auflageflächen zwischen dem Brennstab 5 und dem Halteelementen 3,4 nahezu linienförmig und parallel zur Achse des Brennstabs gerichtet.

- 5 Im Gegensatz hierzu zeigt Fig.4 den Längsschnitt durch eine herkömmliche 5-Punkt-Halterung, bei der der Brennstab nunmehr von einem federnden Halteelement gegen jeweils ein Paar übereinanderliegender Noppen 4a,4b in den anderen Maschenwänden gedrückt wird. Dem Abstand  $d_0$  in Fig.3 entspricht bei dieser
- 10 Halterung der Abstand  $d$ , der üblicherweise 30 mm beträgt. Die Federkraft des federnden Halteelements 3 in Fig.3 beträgt üblicherweise mehr als 5 N.

- Ein Brennelemente mit Abstandhaltern, die eine 5-Punkt-
- 15 Halterung gemäß Fig.4 darstellen, wird im unbestrahlten Zustand (BOL-Zustand) einem Kühlwasserstrom mit der veränderlichen Strömungsgeschwindigkeit  $v$  ausgesetzt, wobei Fig.5 die Amplitude  $A$  der Bewegungen des Brennelements zeigt, gemessen an den Führungsrohren in der Mitte zwischen zwei Abstandhal-
- 20 tern. Man erkennt, dass im Bereich einer Strömungsgeschwindigkeit  $v$  zwischen etwa 5,5 und 6,0 m/s im Brennelement besonders starke Schwingungen mit der Frequenz 25 Hertz angeregt werden. Um das Verhalten am Ende der Einsatzzeit (EOL-Zustand) des Brennelements zu simulieren, also schwächere (relaxierte) Fe-
- 25 derkräfte, ist beim Versuch der Fig. 6 der Außendurchmesser der Brennstab-Hüllrohre geringfügig vermindert worden, während der gleiche Abstandhaltertyp mit den gleichen starken Haltekräften eingesetzt ist. Es zeigt sich, dass durch diese Maß-
- 30 nahme zumindest die in Fig.5 so auffälligen Amplituden weitgehend verschwunden sind.

Bei beiden Versuchen waren Brennstäbe verwendet worden, die durch eine Differenz des Hüllrohr-Innendurchmessers und des

Brennstofftabletten-Außendurchmessers eine Bewegung der Brennstoff-Tabletten und somit eine innere Reibung im Brennstab zugelassen hätten, wenn nicht die Tabletten durch einen Draht fixiert worden wären.

5

Fig.7 zeigt ein der Fig. 5 entsprechendes Frequenzspektrum bei einem Brennelement, bei dem der Mode (N-2) eine Dämpfung von 0,3 % besitzt, während in Fig.8 nunmehr Brennstäbe eingesetzt sind, die keinen Draht aufweisen, aber im übrigen identisch geblieben sind. Die Dämpfung ist in diesem Fall von etwa 0,3 auf etwa 0,5 % erhöht und es zeigt sich, dass diese geringfügige Erhöhung praktisch zum Verschwinden der in Fig.7 auffälligen Schwingungen geführt hat.

10

15

Diese Versuche zeigen, dass die Federkraft üblicher Abstandhalter nicht ausreicht, um selbst im BOL-Zustand Schwingungen hoher Amplitude der Frequenz 25 Hertz zu vermeiden, ja dass sogar die hohe Federkraft schädlich ist und das Erlahmen der Federkraft zu geringeren Amplituden führt. Dagegen ist es offensichtlich hinreichend, wenn die Dämpfung erhöht wird, wobei für die besonders auffällige Schwingung von 25 Hertz bereits eine Dämpfung ausreicht, die nur 0,5 % oder 0,4 % beträgt.

20

25

Eine Federkraft, die eine praktisch starre Verbindung zwischen den Brennstäben und den Abstandhaltern bzw. dem die Abstandhalter tragendes Skelett (Führungsrohre G ) darstellt, kann Relativbewegungen des Brennstabs FR gegenüber den Abstandhaltern SP und somit Abrieb durch Reibung natürlich verhindern, wenn auch Abstandhalter, Führungsrohre und Brennstäbe vollkommen starr sind, wie in Fig.9 als Fall (a) dargestellt ist. Da aber Führungsrohre und Brennstäbe nicht starr, sondern schwingungsfähig sind, können Sie von den Turbulenzen der Strömung in Bewegung gesetzt werden. Wegen der Schwingungsspektren der

30

Fig.5 könnte man annehmen, dass bei 25 Hertz eine Resonanz zwischen den Eigenschwingungen der Führungsrohre G und der Brennstäbe sr vorliegt. Solche Resonanzen zwischen zwei Schwingern sind häufig durch eine Phasenverschiebung gekennzeichnet. Jedoch zeigt Fall (b), dass solche Resonanzen bei sinusförmigen Eigenschwingungen praktisch nicht auftreten können, da der horizontale Abstand zwischen Führungsrohren und dem Brennstäben durch die Abstandhalter SP praktisch konstant gehalten werden. Vielmehr schwingen, wie Fall (c) zeigt, die Führungsrohre und die Brennstäbe synchron und praktisch ohne Phasenverschiebung, wobei außerdem der Winkel  $\phi$  zwischen den Führungsrohren oder Brennstäben einerseits und der normalen der Abstandhalter andererseits näher bei  $0^\circ$  liegt als bei sinusförmiger Schwingung.

Misst man die translatorische Verschiebung eines Brennstab-Abschnittes, die bei einer Schwingung des Falles (c) gegenüber dem Ruhe-Zustand des Falles (a) auftritt, so ergibt sich bei der Biegeschwingung erster Ordnung des Brennelements der in Fig.10 gezeigte Verlauf der Verschiebung D als Funktion des Abstandes H vom unteren Ende des Brennstabs. Die durch die Abstandhalter hervor gerufene Verzerrung der Sinusfunktion ist hierbei deutlich erkennbar.

Noch deutlicher wird die Abweichung von der Sinusform, wenn man aus Fig.10 den Winkel  $\phi$ , also den Kippwinkel zwischen den Brennstab (bzw. Führungsrohres) und der senkrechten auf dem Abstandhalter, ermittelt. Die Abweichung von der Sinusschwingung macht sich dabei durch deutliche Zacken bemerkbar, die jeweils in den Ebenen der Abstandhalter liegen, die sich zwischen dem ersten (untersten) und dem achten (obersten) Abstandhaltern befinden.

25

Ermittelt man für die entsprechende Biegungsschwingung 6. Ordnung den entsprechenden Verlauf des Kippwinkels  $\varphi$ , so zeigt Fi.12, dass nunmehr diese Zacken weitgehend verschwunden sind. Brennstab und Brennelement können sich in diesem Mode also nahezu sinusförmig bewegen ohne gegeneinander zu arbeiten, da die Schwingungsknoten dieser Sinusschwingung praktisch in den Ebenen der Abstandhalter liegen.

Die Ebenen der Abstandhalter sind bei Druckwasserreaktoren praktisch vorgegeben, da die Brennelemente im Kern dicht nebeneinander stehen und sich mit ihren Abstandhaltern aneinander abstützen. Beim Ersatz abgebrannter Brennelemente durch neue Brennelemente sind die Abstandhalter daher auch bei den neuen Brennelementen auf den gleichen Niveau angeordnet sein, auf dass die Reaktoren von Anfang an ausgelegt sind, nämlich Äquidistanten.

Fig.13 erläutert den Einfluss, den die Federkraft der Halteelemente auf eine Schwingung gemäß den Fig.11 und 12 hat. In der Ruhelage des Brennstabs (Position P1) wird der Brennstab von der Federkraft des federnden Halteelements FH derart gegen die starren Halteelemente SH gedrückt, dass der Brennstab senkrecht zum Abstandhalter ausgerichtet ist. Wird nunmehr der Brennstab um den Kippwinkel  $\varphi$  nach der einen Richtung (Position P2) oder anderen Richtung (Position P3) ausgelenkt, so arbeitet das federnde Halteelement FH gegen diese Auslenkung und entnimmt Energie aus der Bewegung des Brennstabs. Gemäß den Fig. 11 und 12 treten diese Auslenkungen aber nur bei niedrigeren Moden auf und werden daher stark gedämpft, während bei hohen Moden praktisch keine Auslenkung in den Ebenen der Abstandhalter auftritt, die Bewegung daher nur schwach gedämpft ist. Die stärkere Dämpfung der niedrigen Moden führt aber da-

zu, dass die von dem turbulenten Kühlwasserstrom übertragene Energie über die Federelemente abgeführt wird, ohne die entsprechende Biegeschwingung zu hohen Amplituden anzuregen. Dagegen führt die geringe Auslenkung in dem Mode der Fig.12 auch  
5 nur zu einer schwachen Dämpfung und zu der entsprechend hohen Anregung, die aus Fig.5 ersichtlich ist.

In Fig.13 sind mit AF die Flächen angegeben, an denen sich der Brennstab an zwei Auflageflächen, die senkrecht zu der Zeichenebene auf dem Brennstab gerichtet sind, entlang bewegt und  
10 daher bei diesen Drehbewegungen der Abrieb auftritt. Dies deckt sich mit den Beobachtungen, dass nämlich nur die starren Halteelemente der Abstandhalter entsprechende Abrieb-Marken auf den Brennstäben der Brennelemente hervorrufen. Außerdem  
15 werden solche Abrieb-Marken bei Testversuchen nur mit solchen Frequenzen der Brennstäbe erreicht, die den Moden (N-2) und (N-3) entsprechen.

Misst man das erforderliche Drehmoment, mit dem der Brennstab  
20 gegen die Kraft der federnden Halteelemente um den Kippwinkel  $\phi$  ausgelenkt wird, so ergibt sich die in Fig.14 gezeigte Hysteresekurve selbst bei geringem aber endlichen Winkel  $\phi = \dots$  ist stets ein endliches Drehmoment erforderlich.

Bei gleicher Federkraft nimmt dieses Drehmoment M jedoch in  
25 dem Maße ab, in dem der axiale Abstand d zwischen dem obersten und untersten Punkt der starren Halteelemente SH verringert wird. Werden dieser Abstand d und die Auflagefläche des federnden Haltelements FH jeweils zu einem Punkt zusammengezogen, wie dies Fig.15 zeigt, so ist selbst für große Kippwinkel  
30  $\phi$  praktisch kein Drehmoment M mehr erforderlich (Fig.16). Das Verhalten des Brennstabs ist nunmehr praktisch unabhängig von

der Federkraft. Allerdings finden trotzdem noch Mikrobewegungen statt, die einer entsprechenden Kippschwingung ständig Energie entziehen, wobei die erhöhte Kipp-Beweglichkeit des derart gelagerten Brennstabs zu einer höheren Dämpfung der entsprechenden Moden führt. In Fig.17 zeigt die Kurve CONV die Dämpfungsfunktion der Auslenkung (Amplitude) des Brennstabs im Mode (N-3) für den Abstand  $d=30\text{mm}$  und die Kurve INV die entsprechende Dämpfung für  $d=3\text{mm}$ . Für den Mode (N-2) ergeben sich die entsprechenden Kurven von Fig.18.

10

Bei dem Konstruktionsprinzip des bereits erwähnten HTP-Abstandhalters (Figuren 19,20,21) werden - mit Ausnahme des Randstegs 30 - Doppelstege 31 verwendet, die aus zwei flächig aneinander liegenden und miteinander befestigten Wänden 32 und 33 gebildet sind. Diese Doppelstege sind derart ineinander gesteckt, dass sich quadratische Maschen 35 bilden, die zur Aufnahme eines Brennstabes 36 oder Führungsrohres 37 dienen. Der Kreuzung 39 von zwei Doppelstegen 31 und 34 hat jeder dieser Doppelstege der Breite  $b$  einen ersten Längsschlitz 38. Ferner trägt jede Wand die eine für die Aufnahme eines Brennstabes bestimmte Masche begrenzt, einen zweiten Längsschlitz 41, wobei beide Schlitzte etwa gleich lang sind (Länge  $l$ ) und etwa in gleichen Abstand von der Unterkante und der Oberkante der Doppelstege enden. In der Mitte zwischen zwei Kreuzungspunkten ist jede Wand, die eine für einen Brennstab vorgesehene Masche begrenzt, in einer zum Brennstab senkrechten Querebene elliptisch bis trapezförmig zur Mitte der von der Wand begrenzten Masche gebogen, so dass zwischen den Wänden ein von unten bis oben durchgehender Zwischenkanal 40 entsteht. Diese Zwischenkanäle sind an ihrem oberen Ende 45 gekrümmt, wodurch das aus diesen Zwischenkanälen ausströmende Kühlwasser einen Drall 47 um den Brennstab erhält. Ferner sind die Wände 48,49 zu beiden Seiten jedes zweiten Schlitzes 41 in einer zu den Brennstäben

30

parallelen Längsebene bogenförmig derart gebogen, dass der betreffende Brennstab auf der Länge  $d$  anliegt, sobald der Brennstab in die Masche eingesetzt ist.

5 Es zeigt sich, dass für das Fretting-Verhalten die Krümmung am Ende 45 der Zwischenkanäle, nicht erforderlich ist. Vielmehr kann es sogar vorteilhaft sein, vollkommen gerade Zwischenkanäle zu benutzen, wobei an den Oberkanten der Wände Strömungsleitflächen angesetzt sein können, die dem Kühlwasser andere Strömungswege einprägen. Ebenso können auch die als Federung der Halteelemente dienenden Ränder der zweiten Schlitze durch andere federnde Halteelemente ersetzt werden, wobei die zweiten Schlitze ganz entfallen können. Außerdem kann es vorteilhaft sein, die Länge  $d$  kleiner als 3mm einzustellen. Während man bei der Konstruktion der bisherigen http-Abstandhalter davorausgegangen ist, dass  $d$  etwa 15 mm beträgt.

Während das Ausführungsbeispiel von Fig.2 und 3 eine Dreipunkthalterung und das Ausführungsbeispiels von Fig.19-21 eine Acht-Punkthalterung darstellt, zeigen Fig.22 und 23 eine Sechs-Punkthalterung. Dabei wird ausgenutzt, dass vorteilhaft alle Halteelemente federnd ausgebildet werden, wobei in diesem Ausführungsbeispiel jeweils eine Feder 50 an einer Wand der Zelle den Brennstab in zwei übereinander liegende Federn 51,52 an der gegenüberliegenden Wand drückt. Fig.23 zeigt außerdem noch in gestrichelter Kontur 53 entsprechende starre Sicherungsglieder zur Begrenzung der Amplituden.

Um die durch die Erfindung erreichte Verminderung von Reibungsschäden zu messen, kann man jeweils die Verringerungen der Wanddicke, die durch Reibung an einem der Halteelemente in einer Masche erzeugt werden, addieren. Die nachfolgenden Tabellen 1 und 2 vergleichen diese Maßzahlen für einen herkömm-

29

lichen Abstandhalter mit  $d=30\text{mm}$  mit den entsprechenden Maßzahlen eines Abstandhalters nach der Erfindung mit  $d=3\text{mm}$ . Die Brennelemente wurden dabei elektromagnetisch in den Modes angeregt, die auch im Reaktor beobachtet wurden, wobei jedoch die Amplituden konstant auf einen hohen Wert eingestellt wurde, um in endlicher Zeit Vergleichswerte zu erhalten. Die dabei auftretenden Unterschiede sind besonders bemerkenswert, weil es diese Unterschiede hauptsächlich auf die unterschiedliche Dämpfung des Modes (N-2) zurückgeht und diese Dämpfung in beiden Fällen gering ist und darauf zurück geht, dass die Beweglichkeit der Brennstäbe die eigentlich als Ursache des Fretting anzusehen ist, deutlich erhöht wird.

Versuch-Nr.	Versuchsdauer 25 h	Versuchsdauer 50 h	Versuchsdauer 75 h	Versuchsdauer 100 h
1	60	120		220
2	80	150	210	250
3	100	130	190	250
4	50	80	150	230

15 Tabelle 1

Versuch-Nr.	Versuchsdauer 25 h	Versuchsdauer 50 h	Versuchsdauer 75 h	Versuchsdauer 100 h
5	10	10	10	10
6	0	0	0	0
7	0	10	10	20



## Ansprüche

5

1. Verfahren zum Vermeiden von Reibungsschäden eines Brennelementes eines mit Leichtwasserreaktors, wobei zumindest Abschnitte der Brennstäbe vom Kühlmittelstrom in transversale Bewegungen versetzt, die Brennstäbe durch Maschen von mehreren übereinander in axialem Abstand angeordneten Abstandhaltern geführt und ihre seitlichen Bewegungen durch Haltelemente in diesen Maschen begrenzt werden, jedoch die Haltelemente spätestens im zweiten Einsatzzyklus des Brennelements nicht mehr eine ausreichende Federkraft besitzen, um zwischen den Haltelementen und den Brennstäben Relativbewegungen, die durch Eigenschwingungen des Brennelements hervorgerufen sind, durch Haftreibung zu Unterdrücken,

10

15

dadurch gekennzeichnet,

dass Abstandhalter und Brennstäbe verwendet werden, die derart aufeinander abgestimmt sind, dass den Eigenschwingungen des Brennelementes durch erhöhte Dämpfung ständig Energie entzogen wird.

20

2. Verfahren nach Anspruch 1,

25

dadurch gekennzeichnet,

dass die erhöhte Dämpfung durch die Energie eingestellt wird, die den Brennstäben durch die Beweglichkeit und Reibung der in den Brennstäben enthaltenen Brennstofftabletten entzogen werden kann.

30

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet,

31

dass die erhöhte Dämpfung durch die Energie eingestellt wird, die dem Brennelement durch eine erhöhte translatorische Beweglichkeit zumindest einiger Brennstäbe in einigen Zellen der Abstandhalter entzogen werden kann.

5

4. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

dass die erhöhte Dämpfung durch Haltelemente eingestellt wird, die bei einem Kippwinkel  $\varphi = 0,1$  des Brennstabes höchstens ein Drehmoment  $M = 10 \text{ N} \cdot \text{mm}$  auf den Brennstab ausüben.

10

5. Brennelement für einen mit einem Leichtwasserstrom gekühlten Kernreaktor, mit Brennstäben, die durch Maschen von mehreren übereinander in axialem Abstand angeordneten Abstandhaltern geführt sind und in ihrer seitlichen Beweglichkeit von Haltekräfte auf die Brennstäbe ausübenden Halteelementen in den Maschen begrenzt sind, wobei die Haltekräfte der Halteelemente spätestens im zweiten Zyklus der Brennelements nicht ausreichen, um zwischen den Halteelementen und den Brennstäben eine Relativbewegung zu unterbinden, die durch eine vom Leichtwasserstrom hervorgerufene Eigenschwingung des Brennelementes bedingt ist,

15

20

dadurch gekennzeichnet,

dass zumindest einige Brennstäbe und Maschen derart aufeinander abgestimmt sind, dass den Eigenschwingungen des Brennelements durch erhöhte Dämpfung ständig Energie entzogen wird.

25

30 6. Brennelement nach Anspruch 5,

dadurch gekennzeichnet,

dass zumindest der unterste Abstandhalter und zumindest die inneren Brennstäbe derart aufeinander abgestimmt sind.

7. Abstandhalter für jeweils mehrere eine Masche des Abstand-  
halters durchsetzende Brennstäbe des Brennelements für einen  
von einem Leichtwasserstrom gekühlten Kernreaktor, mit je-  
weils mehreren Haltelementen, die in unbestrahltem Zustand  
Abstandhalters den Brennstab mit einer vorgegebenen Halte-  
kraft in einer vorgegebenen seitlichen Position innerhalb  
der Masche halten, wobei die Haltekraft spätestens im zwei-  
ten Einsatzzyklus nicht ausreicht, um zwischen den Haltele-  
menten und den Brennstäben eine Relativbewegung, die durch  
Eigenschwingungen des Brennelements hervorgerufen sind, un-  
terdrücken,

dadurch gekennzeichnet,

dass in jeder dieser Maschen die Haltelemente in unbestrahl-  
tem Zustand mehreren langgestreckten Auflageflächen, deren  
Längsausdehnung jeweils mindestens 1mm beträgt, am Brennstab  
anliegen und der höchste Anlagepunkt des Brennstabs in diese  
Masche höchstens 10mm über dem niedrigsten Auflagepunkt des  
Brennstabs in der gleichen Masche liegt.

8. Abstandhalter nach Anspruch 6,

dadurch gekennzeichnet,

dass der höchste Auflagepunkt des Brennstabes höchstens 5mm,  
vorzugsweise höchstens 3mm über dem niedrigsten Auflagepunkt  
des Brennstabs in der gleichen Masche liegt.

9. Abstandhalter nach Anspruch 7 oder 8,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Haltelemente oder Paare von derartigen Halteelemen-  
ten äquidistant über den Umfang des Brennstabs verteilt  
sind.

10. Abstandhalter nach Anspruch 7 bis 9,

33

dadurch gekennzeichnet,  
dass alle Halteelemente ungefähr die gleiche Federkraft  
besitzen.

## Zusammenfassung

5 In einem Leichtwasserreaktor werden die Brennstäbe eines Brennelements mit N Abstandhaltern nur dann durch Reibung an den Haltelementen der Abstandhalter beschädigt, wenn eine Selbst induzierte Biegeschwingung der Ordnung (N-2) und (N-3) vorliegt. Damit die Moden keine gefährlichen Amplituden erreichen, wird die innere Dämpfung des Brennstabs (Reibung der Brennstofftabletten) oder die Beweglichkeit der Brennstäbe in den Abstandhalter-Maschen der Durchmesser der Brennstäbe ist gegenüber den von den Haltelementen definierten Aufnahmeöffnungen verringert oder vorzugsweise durch Haltelemente vergrößert, die an einem Teilstück der axialen Länge  $d \leq 10\text{mm}$  des Brennstabs angreifen.

## Bezugszeichenliste

1,2	Stege	v	Strömungsgeschwindigkeit
5 3	Feder (Halteelement)		
4,4a,4b	Noppe (Halteelement)	35 A	Amplitude
5	Brennstab	D	Verschiebung gegenüber Ruhezustand
30	Außensteg	H	Abstand vom unteren Ende
10 31,34	Doppelsteg		
32,33	Wände	40 FH	federndes Halteelement
35	Masche	AF	Flächen mit Reibung
36	Brennstab		
37	Führungsrohr		
15 38	Längsschlitz		
39	Kreuzung		
40	Zwischenkanal		
41	Längsschlitz		
45	oberes Ende des Zwischenkanals		
47	Drall		
48,49	Wände		
F	Fuß		
25 K	Kopf		
G	Steuerstab-Führungsrohr		
SP	Abstandhalter		
FR	Brennstab		
30 d,d <sub>0</sub>	axialer Abstand		
h1,h2	höchster/niedrigster Auflagepunkt		

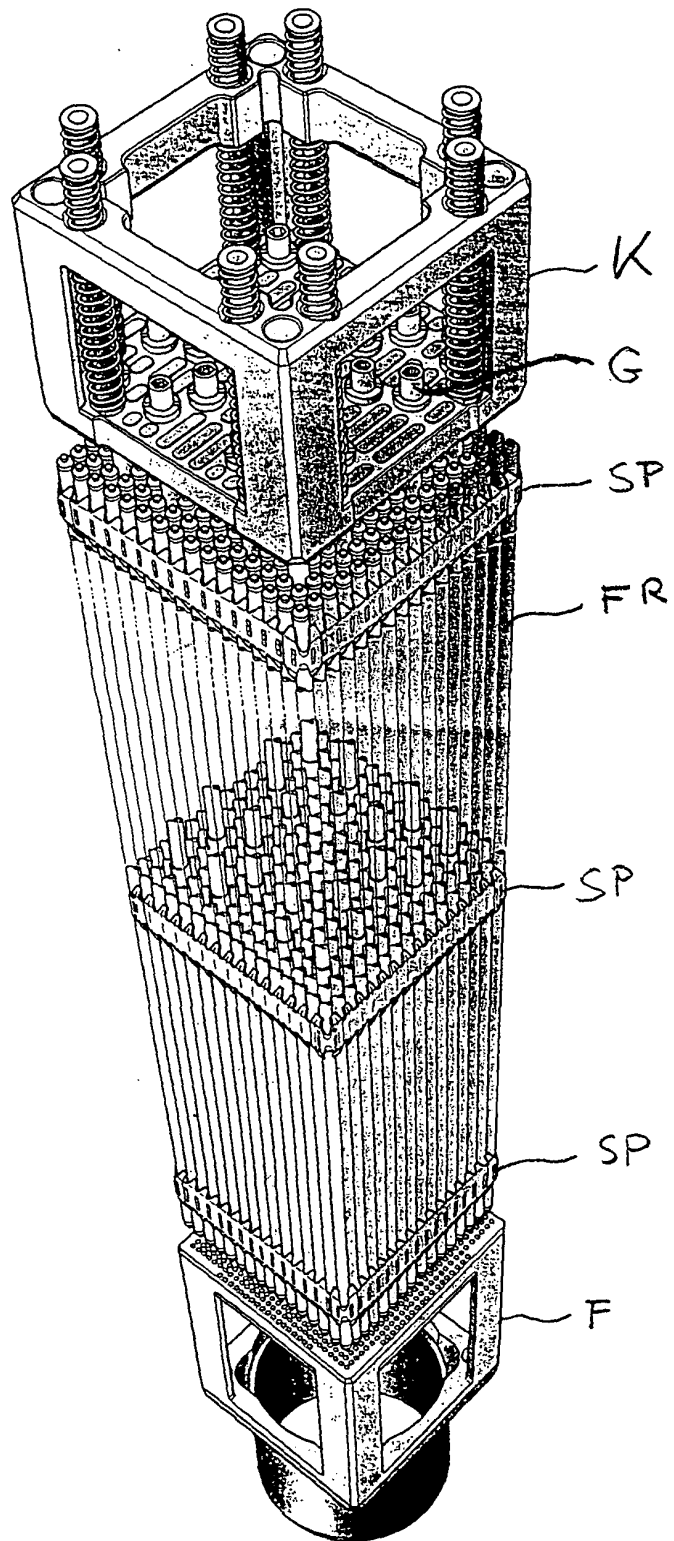


Fig. 1

Fig 2

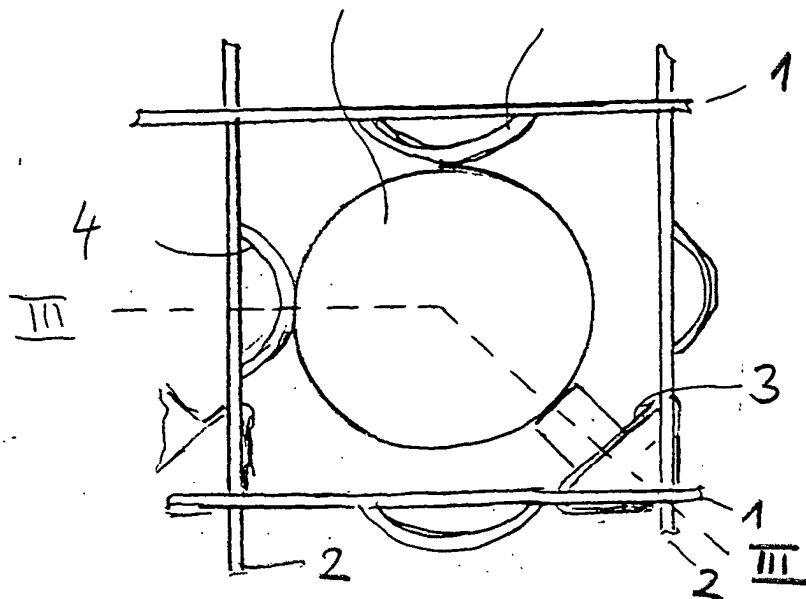


Fig. 3

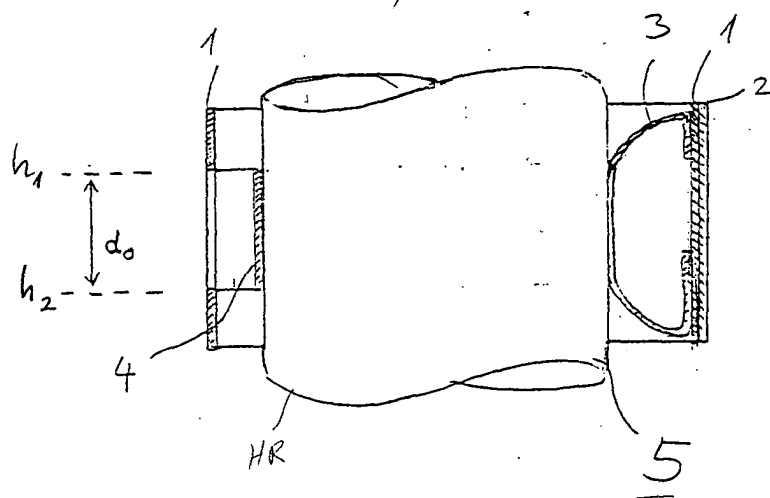
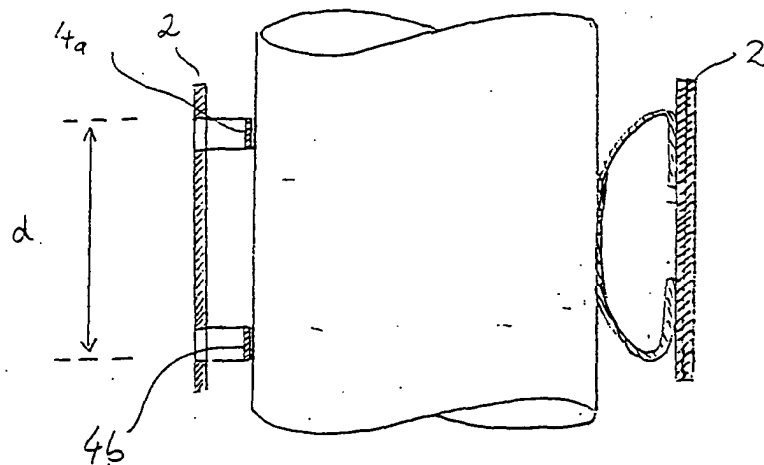
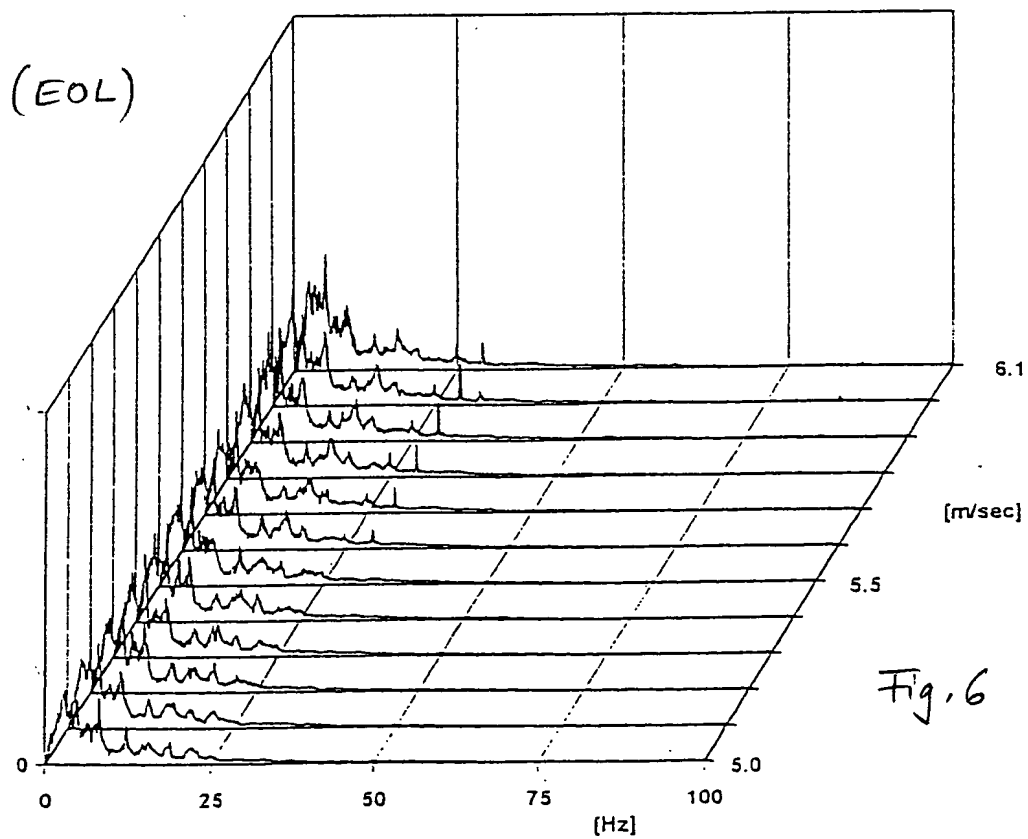
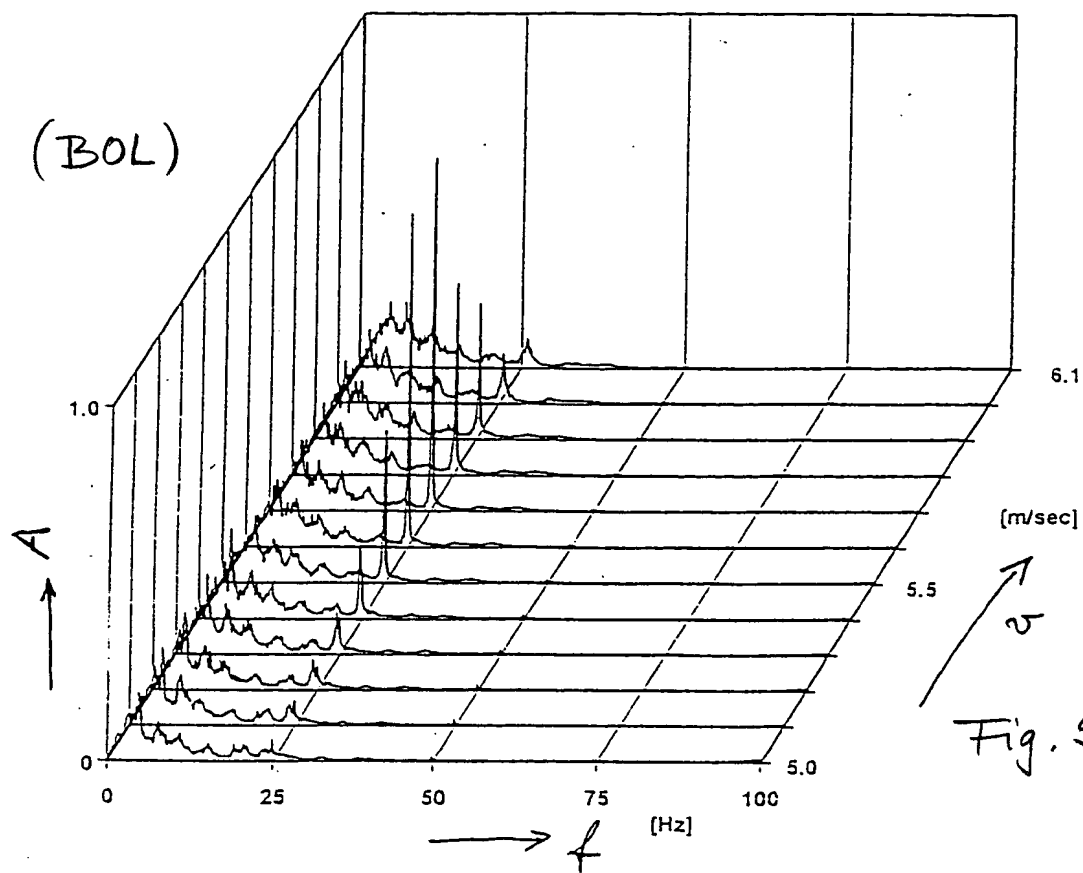
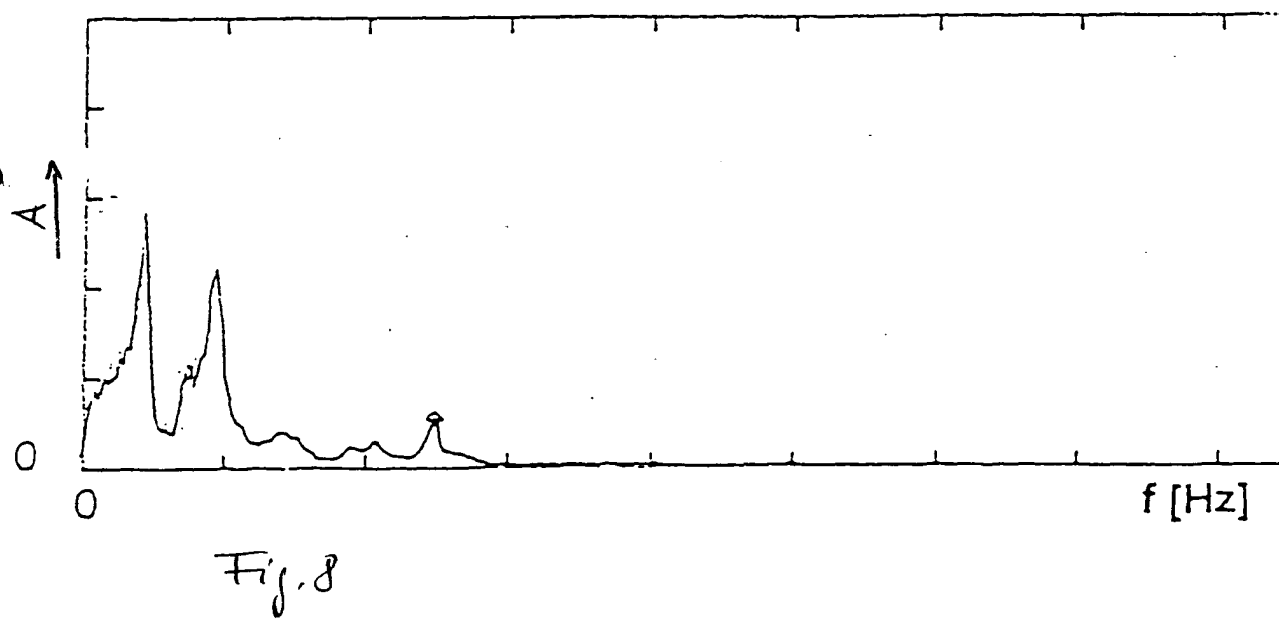
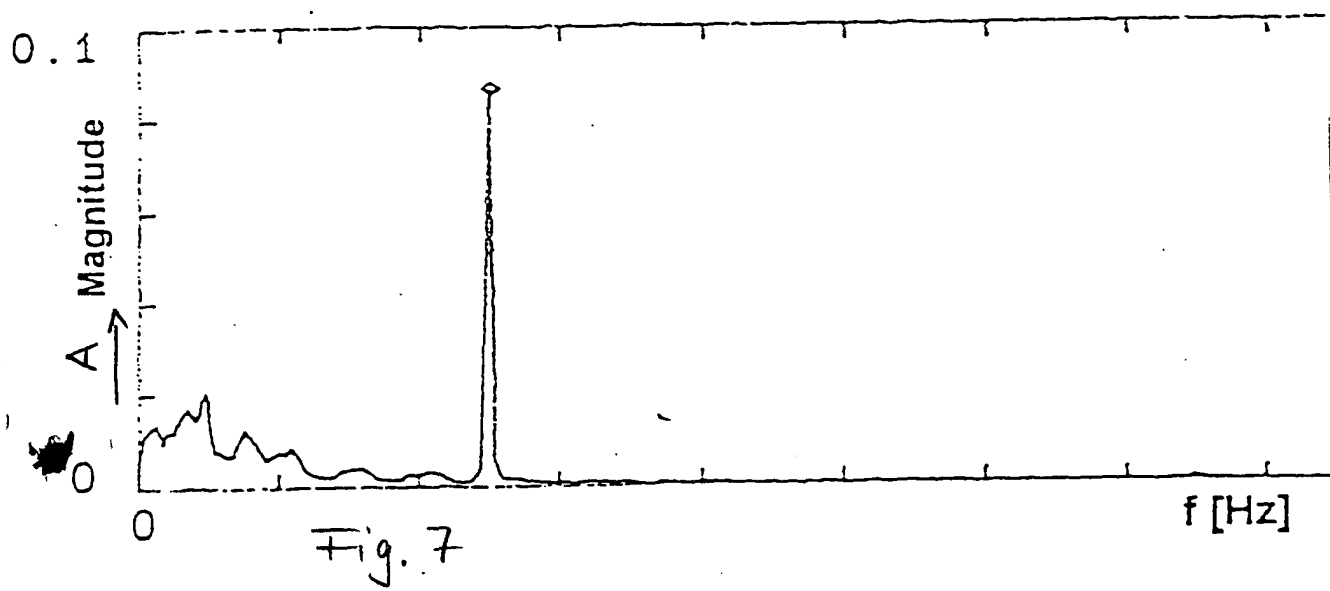


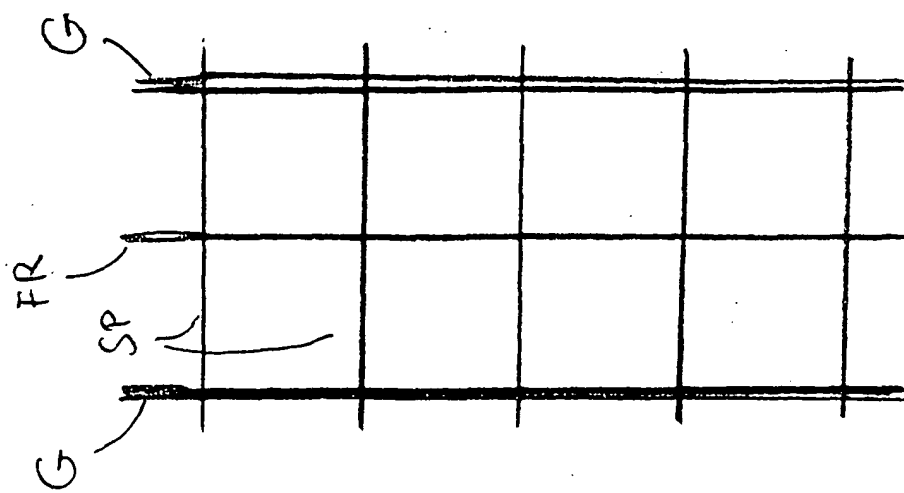
Fig. 4



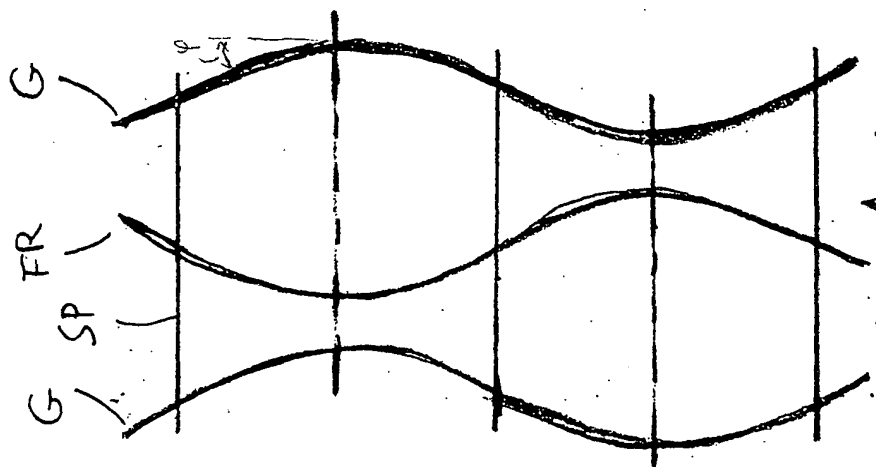




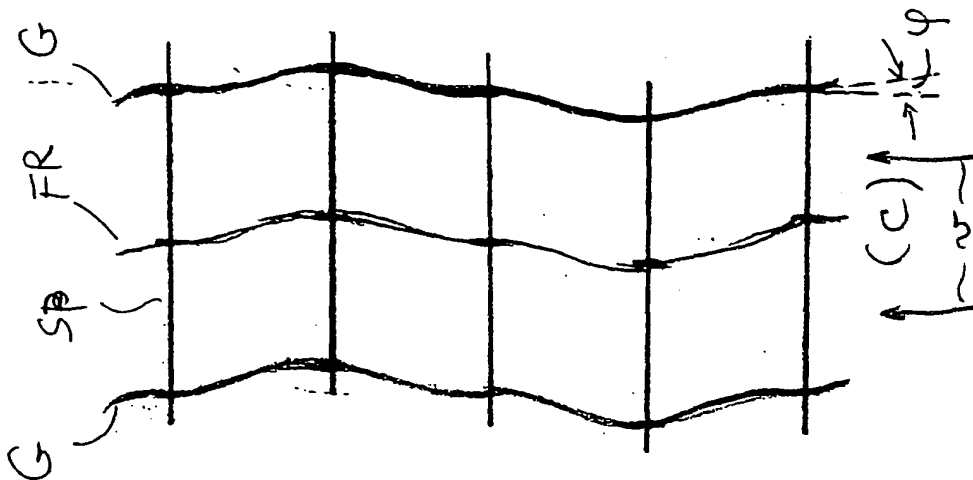




$\uparrow v \uparrow (a)$



$\uparrow v \uparrow (b)$



$\uparrow (c) \uparrow \phi$

Fig. 9

Fig. 10

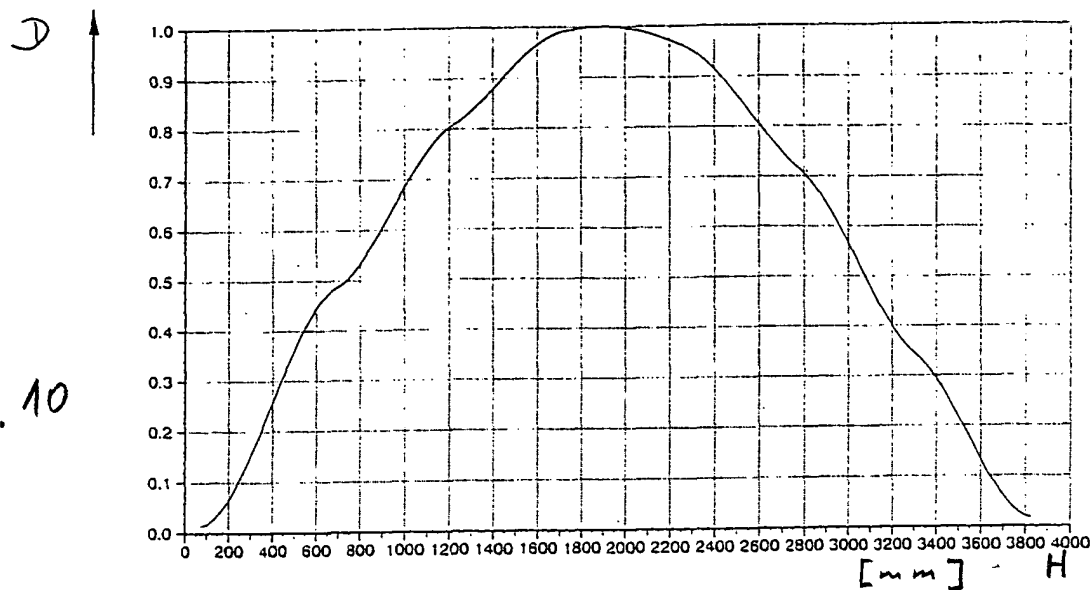


Fig. 11

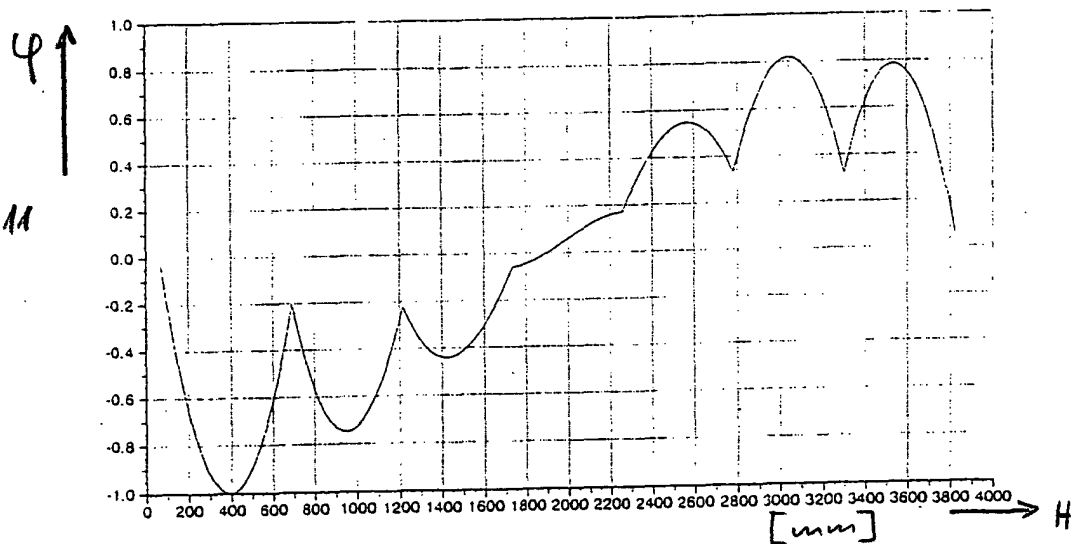
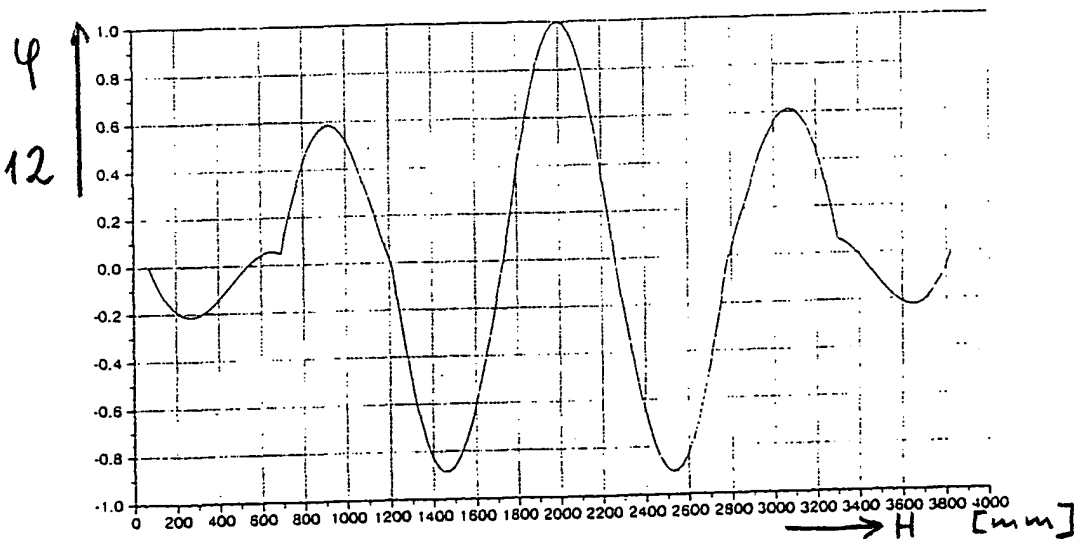


Fig. 12



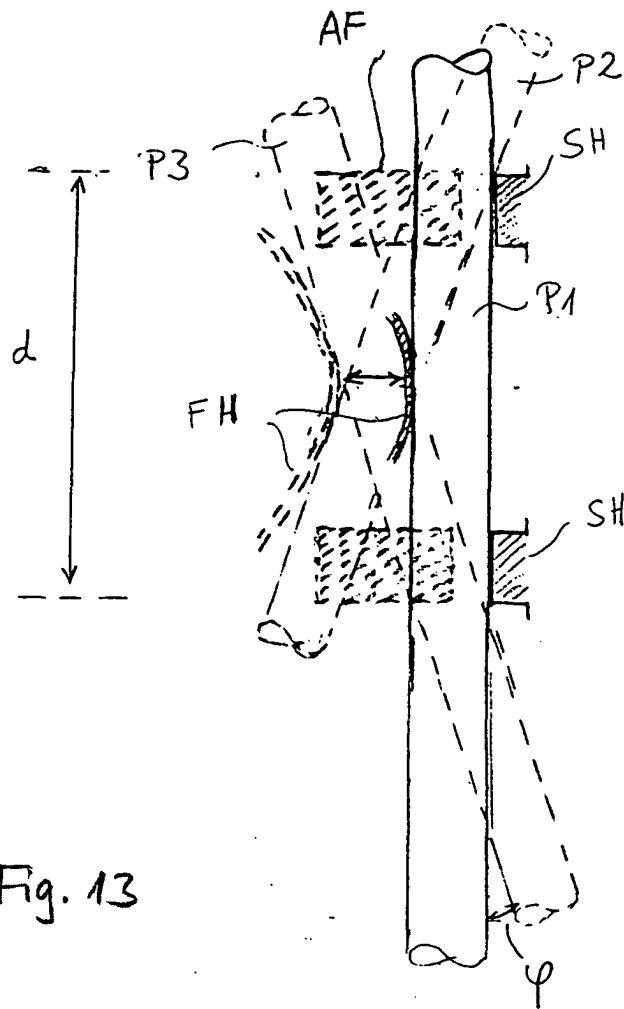


Fig. 13

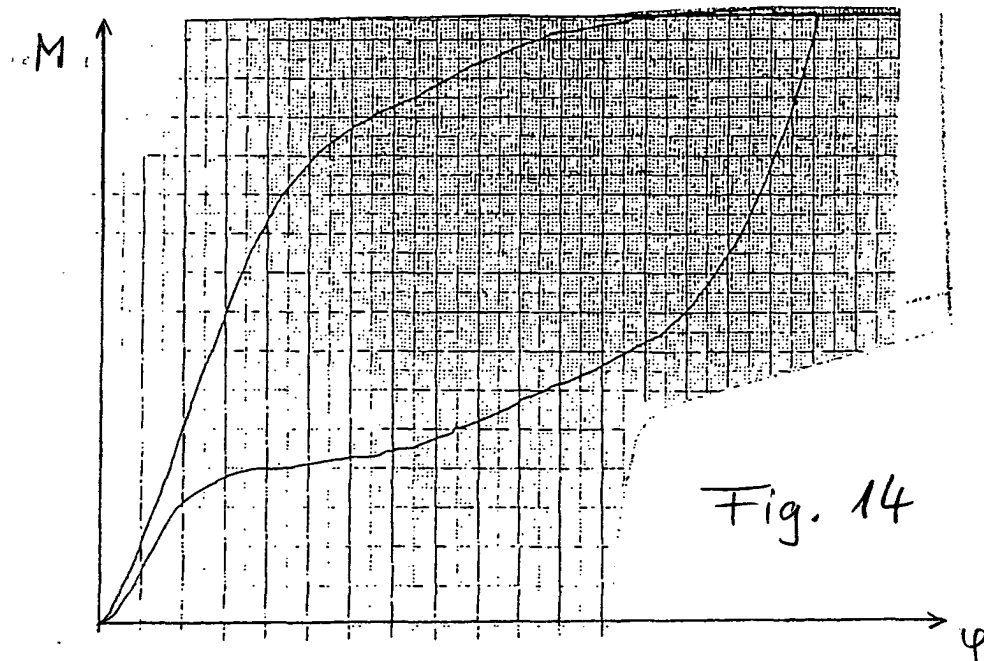


Fig. 14

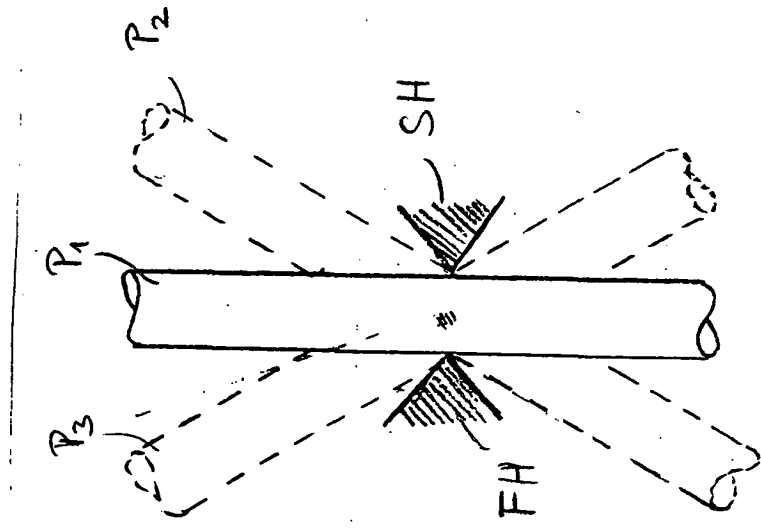


Fig. 15

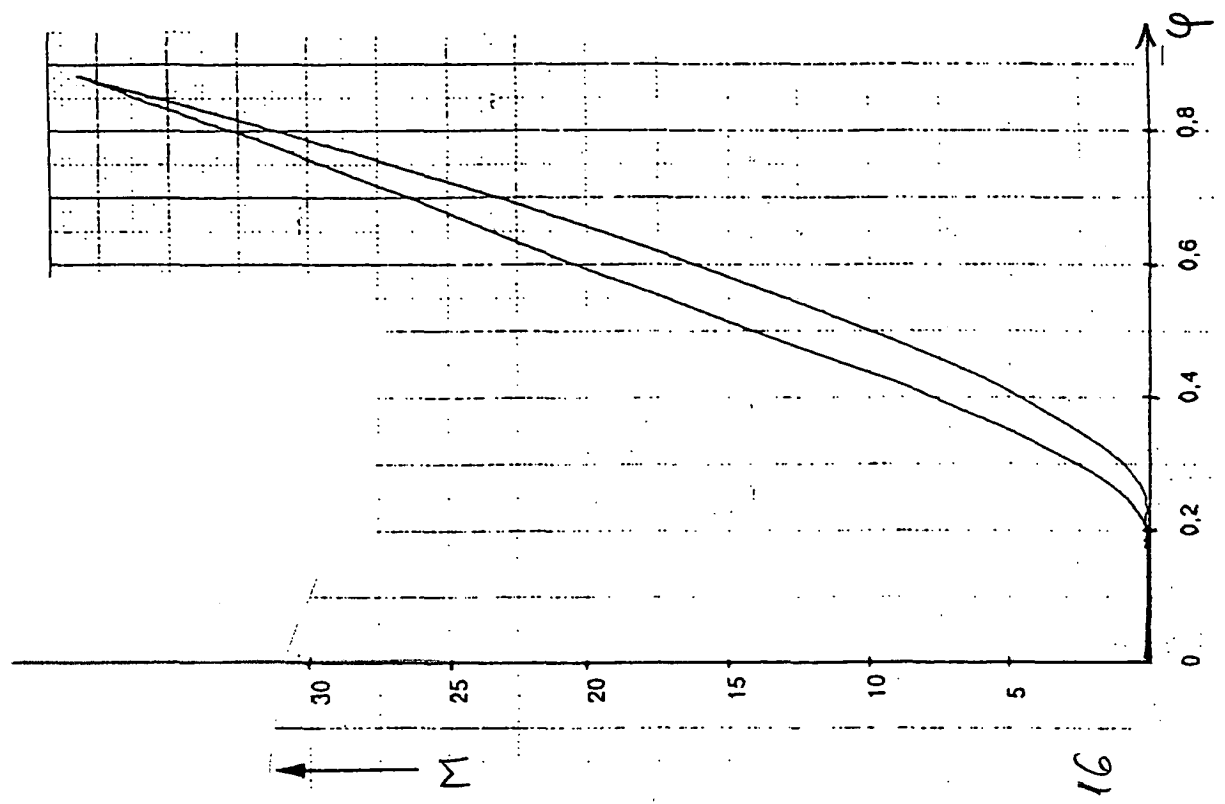


Fig. 16

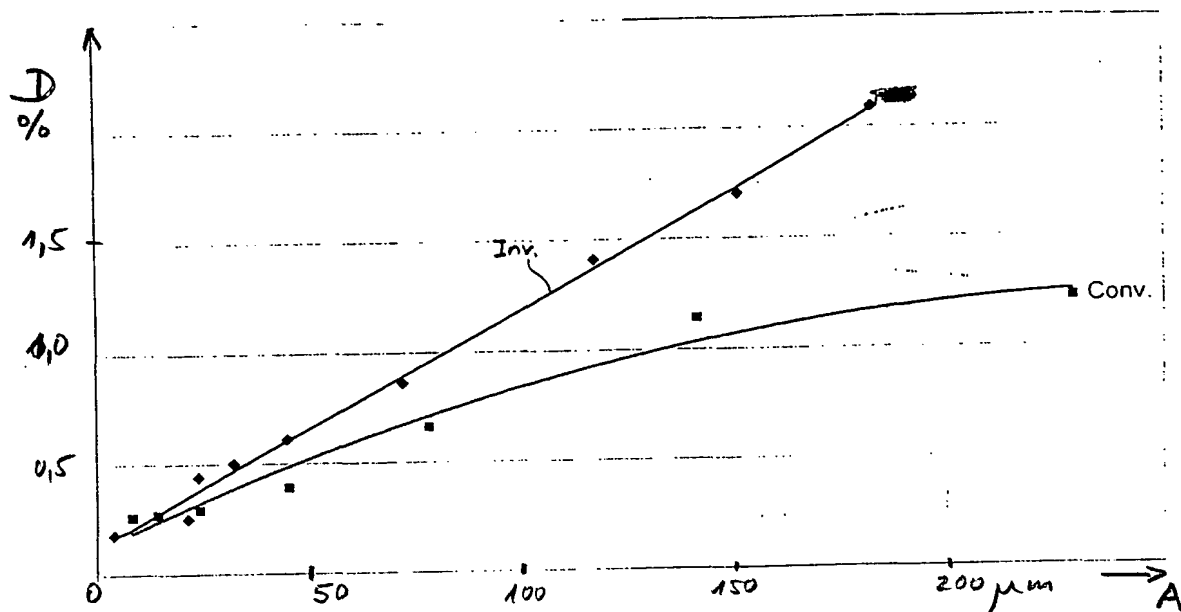


Fig. 17

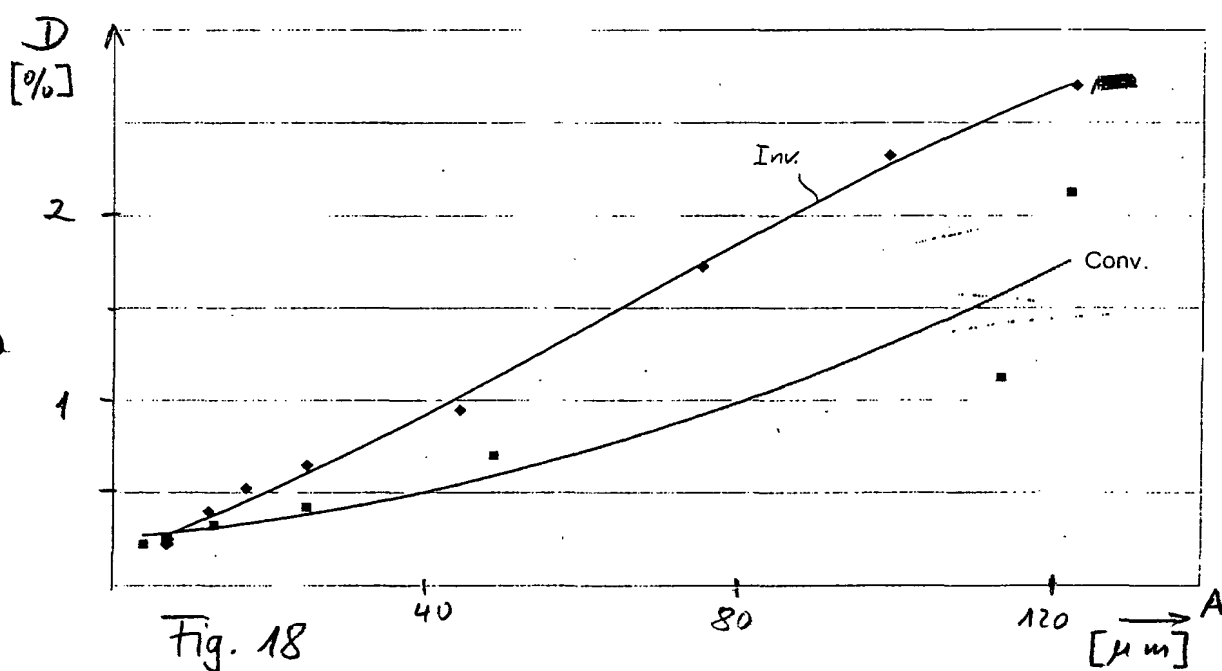
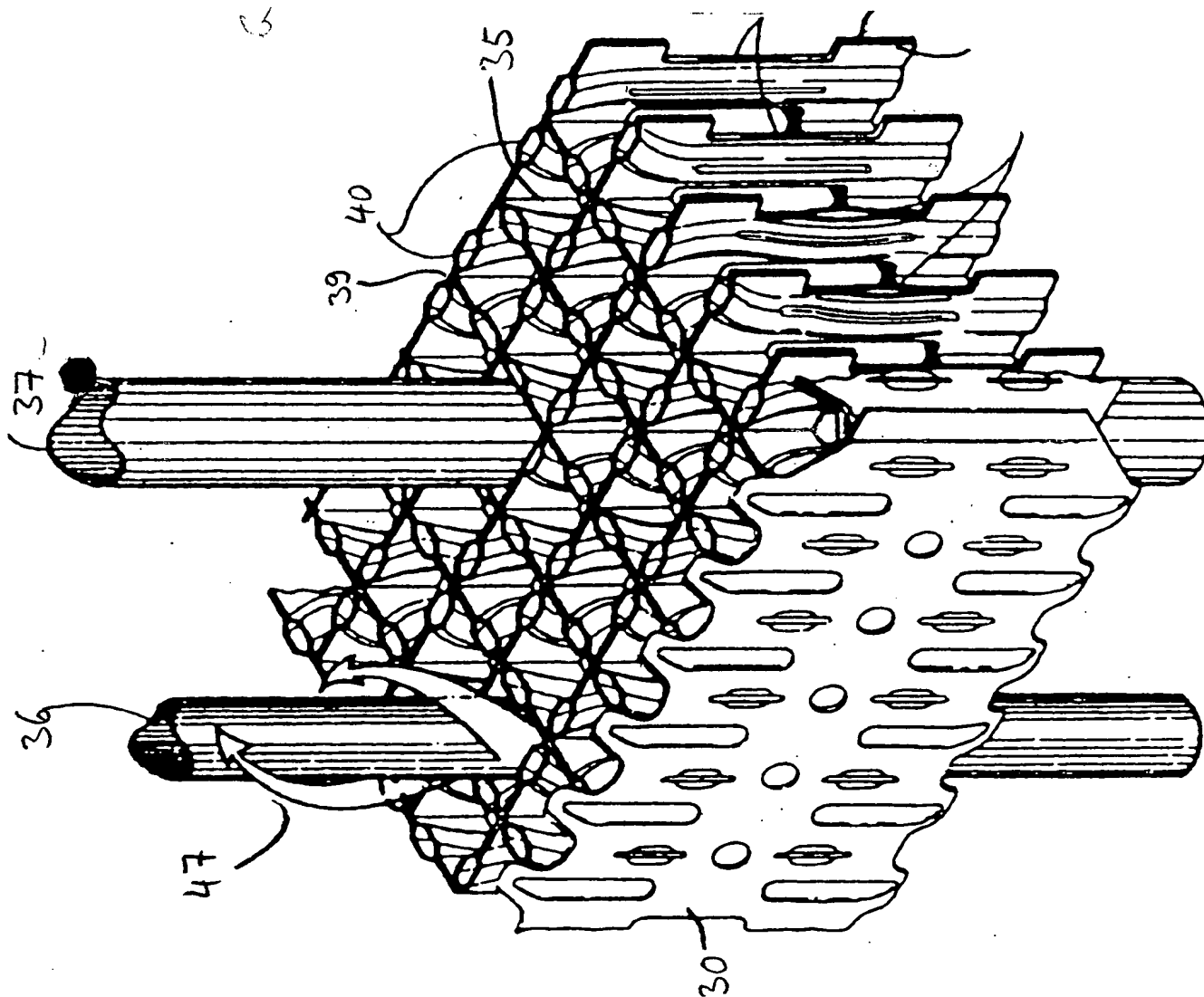
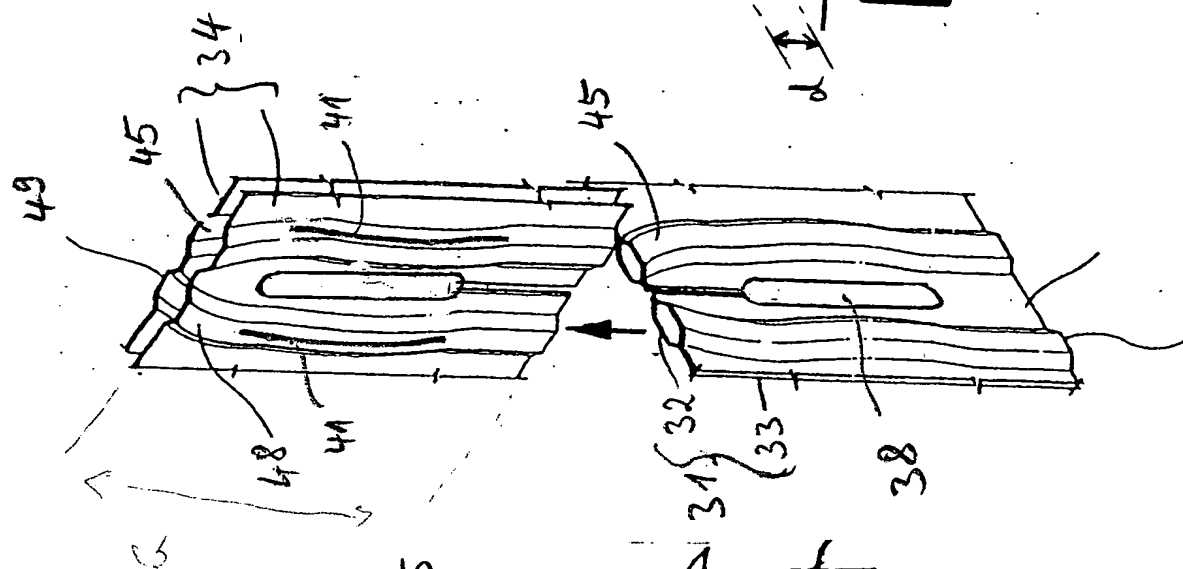
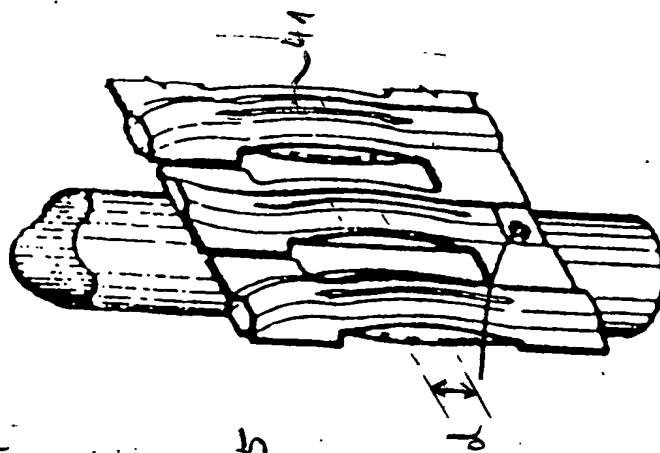


Fig. 18





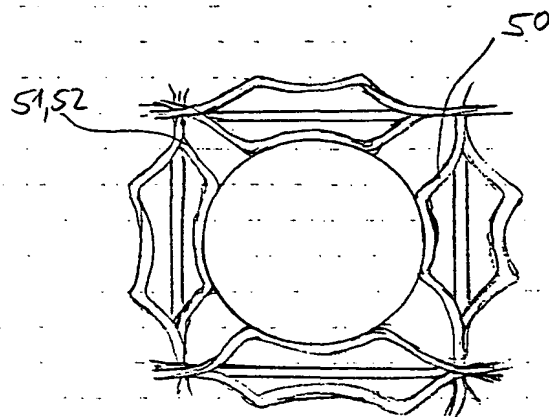


Fig. 2-2

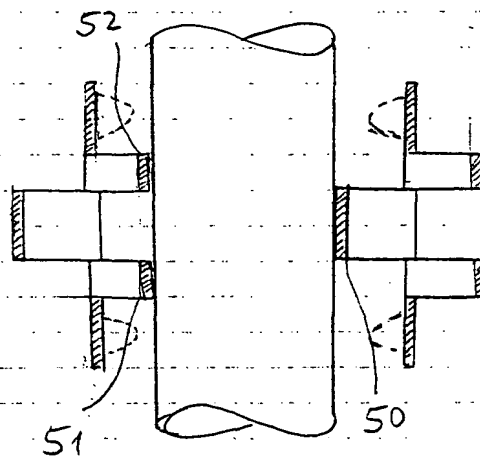


Fig. 23